

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Лисенко Юлія Юріївна

УДК 620.179.147

ДИСЕРТАЦІЯ

ІНФОРМАЦІЙНО – ДІАГНОСТИЧНА СИСТЕМА ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу
речовин
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить власні дослідження. Використання ідей, результатів і текстів
інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Ю.Ю. Лисенко

Науковий керівник Куц Юрій Васильович доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Лисенко Ю.Ю. Інформаційно – діагностична система імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю виробів машинобудування. –Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі удосконалення імпульсного методу вихрострумowego неруйнівного контролю виробів машинобудування за рахунок використання нових для вихрострумowego неруйнівного контролю інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача, дослідженню їх зв'язків з параметрами об'єкта контролю та розробленню інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю.

В роботі проведено аналіз літературних джерел присвячених методу та існуючим засобам імпульсного вихретокового контролю, методам обробки інформаційних сигналів і використовуваним при цьому інформативним параметрам. Встановлено, що метод вихрострумowego контролю з імпульсним збудженням перетворювача має ряд переваг:

- проведення аналізу сигналу вихрострумowego перетворювача в часовій області з оцінкою відповідних інформативних параметрів;
- можливість зміни потужності сигналу для покращення рівня сигнал/шум;
- збільшення глибини проникнення.

В якості інформативних параметрів найчастіше використовуються характерні точки сигналів вихрострумowego перетворювача (максимальне

амплітудне значення, часовий момент перетину сигналом певного амплітудного рівня, часовий інтервал між певними характерними точками та, в деяких випадках, зміна загасання магнітного поля), які є нестійкими до впливу шумів, що призводить до суттєвої похибки результатів вимірювання, та не дозволяють реалізувати потенційні можливості цього режиму збудження. Існуючі відповідні засоби контролю надають кількісну оцінку параметру об'єкта контролю, проте не вказують на дефект та його параметри. Це обґрунтовує необхідність розвитку теоретичного базису, пошуку нових інформативних параметрів вихрострумowego перетворювача і удосконалення багатопараметрових методів контролю шляхом комплексного використання неперервного та імпульсного режимів роботи.

Аналіз процесів формування інформаційних сигналів в ланцюгах перетворювача в імпульсному режимі збудження дозволив визначити умови виникнення загасаючих гармонічних коливань та запропонувати використання в якості інформативних параметрів сигналів перетворювача його власну частоту і коефіцієнт загасання. Отримана математична модель процесів перетворювача дозволяє проводити оцінювання взаємозв'язку інформативних параметрів сигналів перетворювача з параметрами і характеристиками об'єкта контролю.

Для обробки та аналізу інформативних параметрів сигналів перетворювача в імпульсному режимі збудження запропоновано використання амплітудної та фазової характеристики цих сигналів, що визначалися за допомогою перетворення Гільберта. Крім того, для підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналу вихрострумowego перетворювача, запропоновано використання експоненційної апроксимації для амплітудної характеристики і лінійного тренда для фазової характеристики сигналу перетворювача.

Для оцінки ефективності запропонованих методів підвищення точності визначення характеристик сигналів перетворювача проведено моделювання

визначення запропонованих інформативних параметрів сигналу в умовах впливу завад та шумів, яке показало, що використання трендів характеристик сигналів підвищує точність визначення коефіцієнта загасання і частоти власних коливань сигналу перетворювача в кілька разів.

Дискретне перетворення Гільберта та використання лінійного тренду фазової та експоненційної апроксимації амплітудної характеристик сигналу вихрострумового перетворювача покладене в основу розробленої методики обробки і аналізу інформативних параметрів сигналів перетворювача в умовах імпульсного збудження.

За результатами проведеного моделювання також було розроблено алгоритмічне забезпечення, що реалізує запропонований метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів вихрострумового неруйнівного контролю, їх подальше оцінювання та статистичний аналіз, який дозволяє виявляти модуляції характеристик сигналів вихрострумового перетворювача, викликані дефектами об'єкта контролю під час його сканування.

Проведено аналіз похибок визначення частоти власних коливань і коефіцієнта загасання сигналу перетворювача, який дозволив визначити умови отримання мінімальної похибки визначення цих інформативних параметрів сигналу і визначити оптимальний час для його аналізу, що суттєво впливає на результати контролю в умовах впливу перешкод і шумів. Показано, що неоптимальність вибору часового інтервалу аналізу призводить до збільшення відносної похибки в два рази.

В роботі розроблено інформаційно-діагностична система імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю, що реалізує розроблену методику обробки і аналізу інформативних параметрів сигналів перетворювача. На базі цієї системи проведено експериментальне дослідження запропонованих інформативних параметрів для імпульсного вихретокового контролю на серіях зразків (плоскою і циліндричної форми), що підтвердило можливість

використання нових параметрів сигналів перетворювача – власної частоти і коефіцієнта загасання сигналу в задачах вихрострумowego неруйнівного контролю: контролю електропровідності матеріалів, діаметру прутків, товщини діелектричного покриття, глибини залягання дефектів, геометричних параметрів об'єкта контролю.

Ключові слова: імпульсний вихрострумowy неруйнівний контроль, частота власних коливань, коефіцієнт загасання, амплітудна та фазова характеристики сигналу.

Список публікацій здобувача:

1. Лысенко Ю. Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц. // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2011. – №121. – С. 22–24.
2. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумowy контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.
3. Лысенко Ю. Ю. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2013. – №139. – С. 72–74.
4. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2014. – №150. – С. 28–30.
5. Lysenko I. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko_Rev1.pdf (last access: 05.07.17).

6. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумний контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2015. – Вип. 49. – С. 68–74.
7. Лисенко Ю. Ю. Аналіз вихрострумного перетворювача з імпульсним збудженням під час контролю циліндричних об'єктів / Ю. В. Куц, О. Ф. Закревський, Ю. Ю. Лисенко, О. Л. Дугин // Фізико-хімічна механіка матеріалів: міжнар. наук.-техн. журн. / Нац. акад. наук України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка – Львів, 2016. – Том 52, №3. – С. 120–126.
8. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 05.07.17).
9. Лысенко Ю. Ю. Применение методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле / Ю. Ю. Лысенко, Ю.В. Куц, А.В. Дергунов // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2016. – №187. – С. 38–42.
10. Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумному контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51. – С. 58–63.
11. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437.

ABSTRACT

Lysenko I. Information-diagnostic system of pulsed eddy current nondestructive testing for mechanical engineering products. – On right for a manuscript.

Dissertation in support of candidature for a technical sciences degree on specialty 05.11.13 – Devices and Methods for Testing and Materials Structure Determination. – The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation are devoted to the solution of the scientific and technical problem of improving the pulsed eddy current non-destructive testing of mechanical engineering products using the new for eddy current non-destructive testing information parameters of the eddy current transducer signals, the study of their bonds with the parameters of the testing object and the development of the information and diagnostic system of pulsed eddy current non-destructive testing.

In the paper, the literary sources devoted to the method and the existing devices and systems of pulsed eddy current nondestructive testing, the methods of processing information signals and the informative parameters used in this case were analyzed. It was established that the method of eddy-current nondestructive testing with impulse excitation of the transducer has several advantages:

- the possibility of analyzing the signal of the eddy current transducer in the time domain with the evaluation of the relevant informative parameters;
- the ability to change the signal strength to improve the noise-to-signal ratio;
- the possibility of increasing the depth of penetration.

The characteristic points of the eddy current transducer signals are most commonly used as the informative parameters, but it is unstable to the noise effect and it leads to a significant error in the measurement results and does not allow to realize the potential of this mode of excitation. Existing relevant devices and

systems give a quantitative assessment of the testing object parameter, but do not indicate the defect and its parameters. It allows substantiating the theoretical basis development need, the need of searching for new informative parameters of the eddy current transducer in pulsed excitation mode and improvement of multi-parameter testing methods through the integrated use of continuous and pulsed modes of operation.

The analysis of the formation processes of information signals in the transducer circuits in the pulsed excitation mode allowed to determine the requirements of the occurrence of damped harmonic motion and to offer the use of its natural frequency and decrement as informative parameters of the transducer signals. The obtained mathematical model of the transducer processes allows evaluating the interrelationship of the informative parameters of the transducer signals with the parameters and characteristics of the testing object.

In order to process and analyze the information parameters of the transducer signals in the pulsed excitation mode, it was proposed to use the amplitude and phase characteristics of these signals determined by Hilbert transformation. In addition, in order to improve the accuracy of the determination of the informational parameters of the eddy current transducer signal, it is offered to use the exponential approximation for the amplitude characteristic and the linear trend for the phase characteristic of the transducer signal.

Also, it was carried out the simulation of the determination of proposed signal informational parameters with noise influence conditions to evaluate the effectiveness of the proposed methods that increase the accuracy of the transducer signals characteristics. The simulation showed that the use of signal characteristics trends increases the determination accuracy of the decrement and the natural oscillation frequency of the transducer signal several times.

The discrete Hilbert transformation and the use of the linear trend of phase and exponential approximation of the amplitude characteristics of the eddy current

transducer signal are the basis of the developed method of processing and analysis of the transducer signal information parameters in the condition of pulse excitation.

Based on the results of the simulation, computer program was also developed that implements the proposed method of determining and analyzing the discrete amplitude and phase characteristics of the eddy current nondestructive testing signals, their subsequent evaluation and statistical analysis, which allows to detect the modulation of the characteristics of the eddy current transducer signals caused by testing object defects during its scanning.

The analysis of the determination errors of the natural oscillation frequency and the decrement of the transducer signal. It allowed determining the conditions for obtaining the minimum determination error of these signal informative parameters and the optimal time for its analysis, which significantly affects the testing results under the noise influence. It is shown that the non-optimal choice of the analysis time interval leads to an increase in the relative error twice.

The information-diagnostic system of pulsed eddy current non-destructive testing which implements the developed method of processing and analysis of the transducer signal informative parameters is developed in the paper. The experimental study of the proposed informative parameters for pulse eddy current testing on series of samples (flat and cylindrical forms) was conducted using this system. It confirmed the possibility of using new transducer signal parameters - the natural oscillation frequency and signal decrement in eddy current non-destructive testing tasks: testing and evaluation of the electrical conductivity of the materials, the rods diameter, the thickness of the dielectric coating, the depth of defects, the geometric parameters of the testing object.

Keywords: pulsed eddy-current non-destructive testing, natural oscillation frequency, decrement, amplitude and phase characteristic of signal.

Список публікацій здобувача:

3. Лысенко Ю. Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц. // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2011. – №121. – С. 22–24.
4. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумівий контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.
3. Лысенко Ю. Ю. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2013. – №139. – С. 72–74.
4. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2014. – №150. – С. 28–30.
5. Lysenko I. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko_Rev1.pdf (last access: 05.07.17).
6. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумівий контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2015. – Вип. 49. – С. 68–74.
7. Лисенко Ю. Ю. Аналіз вихрострумівового перетворювача з імпульсним збудженням під час контролю циліндричних об'єктів / Ю. В. Куц, О. Ф. Закревський, Ю. Ю. Лисенко, О. Л. Дугин // Фізико-хімічна механіка матеріалів: міжнар. наук.-техн. журн. / Нац. акад. наук України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка – Львів, 2016. – Том 52, №3. – С. 120–126.

8. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 05.07.17).

9. Лысенко Ю. Ю. Применение методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле / Ю. Ю. Лысенко, Ю.В. Куц, А.В. Дергунов // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2016. – №187. – С. 38–42.

10. Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51. – С. 58–63.

11. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАСАД ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....	24
1.1. Загальні положення та сучасні вимоги до вихрострумowego контролю	24
1.2. Огляд методів та засобів аналізу інформації у вихрострумowego контролі	28
1.2.1. Методи контролю з гармонічним збудженням вихрових струмів.....	28
1.2.1.1. Двопараметровий метод вихрострумowego контролю ...	29
1.2.1.2. Багатопараметровий метод вихрострумowego контролю.....	33
1.2.2 Методи контролю з імпульсним збудженням вихрових струмів.....	38
1.3. Апаратне та нормативне забезпечення імпульсного вихрострумowego контролю	54
1.4. Аналіз похибок вимірювання існуючих засобів вихрострумowego неруйнівного контролю	60
1.5. Мета та завдання дисертаційної роботи.....	63
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА СИГНАЛІВ СИСТЕМИ «ВИХРОСТРУМОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ – ОБ’ЄКТ КОНТРОЛЮ» ЗА УМОВИ ІМПУЛЬСНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА	65
2.1. Аналіз роботи параметричного вихрострумowego перетворювача з імпульсним збудженням в режимі холостого ходу	65

2.2. Аналіз процесів в системі «параметричний вихрострумний перетворювач – немагнітний об’єкт контролю»	70
2.3. Аналіз процесів в системі «параметричний вихрострумний перетворювач – магнітний об’єкт контролю» в режимі контролю	74
2.4. Аналіз роботи трансформаторного вихрострумного перетворювача в режимі холостого ходу	75
2.5. Перетворення Гільберта як методологічна основа аналізу інформаційних сигналів імпульсного вихрострумного неруйнівного контролю	78
Висновки до розділу 2	85
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО – ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ	87
3.1. Розроблення методів підвищення точності визначення характеристик сигналів вихрострумного перетворювача в імпульсному режимі	87
3.1.1. Підвищення точності визначення амплітудної характеристики сигналів перетворювача	88
3.1.2. Підвищення точності визначення власної частоти сигналів вихрострумного неруйнівного контролю в імпульсному режимі збудження	91
3.2. Обґрунтування структури інформаційно - діагностичної системи вихрострумного неруйнівного контролю	94
3.3. Алгоритм роботи інформаційно - діагностичної системи вихрострумного неруйнівного контролю	95
3.4. Методика аналізу інформаційних сигналів в інформаційно-діагностичній системі імпульсного вихрострумного неруйнівного контролю	96
3.5. Аналіз невизначеності вимірювання характеристик сигналів вихрострумного перетворювача	102

Висновки до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО - ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	111
4.1. Модельні дослідження процесів в системі «параметричний вихрострумний перетворювач – об’єкт контролю»	111
4.2. Реалізація аналізу сигналів імпульсного вихрострумного контролю в часовій області аналізу	114
4.3. Контроль параметрів та характеристик об’єктів циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів.....	118
4.3. Контроль товщини діелектричного покриття на електропровідній основі	120
4.4. Імпульсна вихрострумова дефектоскопія виробів із застосуванням мультидиференціального вихрострумного перетворювача.....	124
Висновки до розділу 4	136
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТОК А.....	158
ДОДАТОК Б.....	160
ДОДАТОК В.....	161
ДОДАТОК Г	163
ДОДАТОК Д.....	165
ДОДАТОК Е.....	166

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АХС – амплітудна характеристика сигналу

ВСНК – вихрострумний неруйнівний контроль

ВСП – вихрострумний перетворювач

ДПГ – дискретне перетворення Гільберта

е.р.с. – електрорушійна сила

ІВСНК – імпульсний вихрострумний неруйнівний контроль

ІРЗ – імпульсний режим збудження

НК – неруйнівний контроль

ОК – об'єкт контролю

ПАЗ – програмно-алгоритмічне забезпечення

ПГ – перетворення Гільберта

ПК – персональний комп'ютер

СКВ – середньоквадратичне відхилення

ФХС – фазова характеристика сигналу

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вихрострумний неруйнівний контроль широко застосовується у різних галузях науково-промислового комплексу України завдяки високій ефективності та надійності вирішення завдань дефектоскопії, контролю якості матеріалів та виробів, визначення параметрів та характеристик об'єктів контролю різного призначення. Актуальними напрямками розвитку даного виду неруйнівного контролю є: розширення діапазону вимірювань та контролю; відстроювання від перешкоджаючих факторів; розвиток методів та засобів багатопараметрового контролю; підвищення чутливості та точності засобів контролю; підвищення вірогідності та інформативності контролю; розширення функціональних можливостей.

Реалізація таких напрямів може бути здійснена не тільки за рахунок удосконалення вихрострумних перетворювачів, але й шляхом урізноманітнення та удосконалення способів збудження вихрових струмів та застосування нових методів аналізу вихідних сигналів вихрострумного перетворювача.

Значний внесок у розвиток теорії та практики вихрострумного неруйнівного контролю зробили відомі вітчизняні та закордонні вчені: Білокур І.П., Бучма І.М., Дорофєєв О.Л., Карпаш О.М., Ключєв В.В., Кісіль І.С., Луценко Г.Г., Маєвський С.М., Гальченко В.Я., Яцун М.А., Хандецький В.С., Мірошніков В.В., Себко В.П., Сухоруков В.В., Сучков Г.М., Тетерко А.Я., Тюпа І.В., Учанін В.М., Шкарлет Ю.М., M.J. Johnson, M. L. Burrows, R. A. Morris, S. B. Chan та ін.

В практиці імпульсного вихрострумного неруйнівного контролю найчастіше використовуються такі інформативні ознаки сигналів, як зміщення моменту перетину сигналом певного рівня, часовий інтервал між певними вузловими точками або пікові значення амплітуди та перевищення амплітуди певних порогових значень та моменти цих перетинів. На сьогоднішній день одним з недоліків даного методу є використання окремих характерних точок сигналу

вихрострумowego перетворювача, тобто неповне використання інформаційних можливостей сигналу вихрострумowego перетворювача та незахищеність вищезгаданих точкових характеристик від впливу завад.

Крім того, з аналізу літературних джерел видно, що імпульсний режим збудження (ІРЗ) вихрострумowego перетворювача дозволяє доповнити традиційний вихрострумований неруйнівний контроль з гармонічним збудженням, проте сьогодні, в умовах швидкого розвитку методів та засобів аналізу сигналів, імпульсний режим збудження є недостатньо дослідженим.

На сьогодні найбільшого розвитку набули методи вихрострумowego неруйнівного контролю, орієнтовані на використання гармонічних сигналів для збудження вихрових струмів в об'єкті контролю. У цьому випадку електрофізичні характеристики матеріалів і геометричні параметри об'єкту контролю найчастіше визначаються через такі параметри інформаційних сигналів вихрострумowego перетворювача як амплітуда і фазовий зсув. Аналіз вихідних сигналів вихрострумowego перетворювача та інтерпретація результатів контролю ускладнює дія ряду перешкоджаючих факторів, серед яких найбільш небезпечними є зазор між вихрострумовим перетворювачем та об'єктом контролю, варіація електромагнітних властивостей металу, кривизни та шорсткості поверхні об'єкту контролю, зовнішні та апаратурні шуми та завади різної природи.

Найчастіше вихрострумований неруйнівний контроль реалізується за рахунок збудження вихрових струмів гармонічними сигналами на одній частоті, що теоретично допускає визначення двох параметрів системи «вихрострумований перетворювач – об'єкт контролю». Останні мають чинити дію на амплітуду та початкову фазу сигналу вихрострумowego перетворювача. Для розширення функціональних можливостей вихрострумowego неруйнівного контролю, доцільно розглянути застосування інших режимів збудження вихрових струмів і здійснити пошук та аналіз інших інформативних параметрів. Один з таких напрямів дослідження пов'язаний з використанням імпульсного режиму

збудження вихрових струмів. Удосконалення на цій основі методів аналізу сигналів вихрострумового неруйнівного контролю спрямовано на пошук нових інформативних параметрів сигналів вихрострумового перетворювача, підвищення достовірності контролю, удосконалення способів зменшення впливу різних перешкоджаючих факторів, що діють в системі «вихрострумівий перетворювач – об'єкт контролю», та розширення функціональних можливостей вихрострумового неруйнівного контролю. Таким чином, розвиток методів та засобів імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю є актуальним завданням розвитку цього виду контролю.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського в рамках державних науково-дослідних робіт «Прецизійні методи фазових вимірювань та цифрового опрацювання сигналів неруйнівного контролю авіаційної техніки» (№0113U000086) та «Дослідження вихрострумового методу неруйнівного контролю з використанням імпульсного збудження перетворювача» (№0116U004742), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-технічної задачі удосконалення імпульсного методу вихрострумового неруйнівного контролю за рахунок використання нових для вихрострумового неруйнівного контролю інформативних параметрів сигналів вихрострумового перетворювача, розроблення інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

– проаналізувати сучасні засоби вихрострумового неруйнівного контролю з імпульсним збудженням та існуючі методи аналізу інформаційних сигналів вихрострумового перетворювача, обґрунтувати необхідність та можливість розробки інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю виробів машинобудування;

– удосконалити фізико-математичну модель системи «вихроstromовий перетворювач – об’єкт контролю» в умовах імпульсного збудження перетворювача з метою пошуку нових інформативних параметрів сигналів вихроstromового перетворювача та зв’язку цих параметрів сигналу перетворювача з параметрами та характеристиками об’єкта контролю;

– розробити метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів імпульсного вихроstromового неруйнівного контролю, який ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта та статистичному згладжуванні характеристик сигналів вихроstromового перетворювача;

– провести аналіз похибок визначення характеристик сигналів вихроstromового перетворювача у формі загасаючих гармонічних коливань та визначити їх вплив на запропоновані інформативні параметри імпульсного вихроstromового неруйнівного контролю;

– провести математичне моделювання запропонованого методу аналізу сигналів вихроstromового перетворювача в умовах імпульсного збудження та за умови впливу адитивних гауссових шумів, розробити методику та алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропонований метод аналізу сигналів вихроstromового перетворювача та отримання амплітудної та фазової характеристик сигналів з їх подальшим статистичним аналізом;

– розробити інформаційно-діагностичну систему імпульсного вихроstromового неруйнівного контролю, що використовує запропоновані інформативні параметри сигналів вихроstromового перетворювача в умовах імпульсного збудження та розроблену методику та алгоритмічне забезпечення їх аналізу та оцінювання;

– впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

Об’єкт дослідження – процес формування та аналізу інформаційних сигналів вихроstromового неруйнівного контролю виробів машинобудування.

Предмет дослідження – методи і засоби вихрострумowego неруйнівного контролю та відповідні методики цифрового аналізу інформаційних сигналів вихрострумowych перетворювачів з імпульсним режимом збудження вихрових струмів.

Методи дослідження базуються на використанні: методів технічної діагностики і неруйнівного контролю; теорії вимірювань та методи електричних вимірювань; теорії електричних кіл, зокрема методів аналізу перехідних процесів, теорія функції комплексної змінної; цифрових методів аналізу сигналів: перетворення Гільберта, чисельні методи апроксимації функцій; методи математичного аналізу: теорія функцій, диференціальне та інтегральне числення, диференціальні рівняння); комп'ютерного моделювання та обробки експериментальних даних, які виконані в системі MatLab; теорії ймовірності та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено фізико-математичну модель системи «вихрострумовой перетворювач – об'єкт контролю» за рахунок врахування додаткових ємності та опору в еквівалентній схемі вихрострумowego перетворювача для аналізу процесів формування сигналів перетворювача з імпульсним збудженням, представлених у формі загасаючих гармонічних коливань, та вперше запропоновано використання власної частоти і коефіцієнта загасання в якості інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача, що дозволило встановити функціональні зв'язки цих інформативних параметрів з параметрами об'єкту контролю.

2. Запропоновано метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю, який ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта та статистичному згладжуванні характеристик сигналів вихрострумowego перетворювача, що забезпечує підвищення точності визначення функціональних залежностей між власною частотою

коливань і коефіцієнтом загасання сигналів вихрострумowego перетворювача та параметрами і характеристиками об'єкта контролю.

3. Запропоновано та обґрунтовано аналітичні вирази критерію вибору часового інтервалу аналізу сигналів вихрострумowego перетворювача, що дозволило мінімізувати похибки визначення запропонованих інформативних параметрів сигналу перетворювача.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що

1. Розширено науково-технічну базу проектування засобів вихрострумowego неруйнівного контролю за рахунок використання нових інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача, які доступні в імпульсному режимі збудження перетворювача і надають нові можливості для створення багатопараметрових методів контролю шляхом комплексного використання неперервного та імпульсного режимів роботи.

2. Розроблено методику та алгоритмічне забезпечення, яке реалізує запропонований метод аналізу сигналів вихрострумowego перетворювача та отримання амплітудної та фазової характеристик сигналів з їх подальшим статистичним аналізом та оцінюванням.

3. Створено дослідний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю для проведення експериментальних досліджень роботи різних типів вихрострумowego перетворювача в умовах імпульсного збудження на серіях зразків (пласкої та циліндричної форми), що підтвердило можливість використання запропонованих інформативних параметрів сигналів перетворювача у формі загасаючих гармонічних коливань – власної частоти та коефіцієнта загасання сигналу в завданнях контролю електропровідності матеріалів, діаметру прутків, товщини покриття, глибини залягання дефектів, геометричних параметрів об'єкта контролю.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), у

навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Роботи [96, 120] написані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [91, 93, 107, 113, 118, 119] – аналіз методів опрацювання сигналів вихрострумowego перетворювача в імпульсному режимі збудження; [99, 110, 115] – аналіз можливості використання перетворення Гільберта в задачі аналізу сигналів вихрострумowego перетворювача; [73, 75, 121] – розробка математичної моделі процесу формування реакції системи «вихрострумний перетворювач – об’єкт контролю» з імпульсним режимом збудження вихрових струмів; [94, 107, 108, 109] – розробка інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю для оцінювання параметрів та характеристик виробів машинобудування; [98, 117] – аналіз залежності інформативних параметрів сигналу вихрострумowego перетворювача від параметрів та характеристик об’єкта контролю та розробка способу двопараметрового контролю об’єктів циліндричної форми за рахунок оцінювання діаметру та електропровідності матеріалу; [112, 114, 123] – аналіз можливості підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача з імпульсним режимом збудження за рахунок використання методів апроксимації амплітудної та фазової характеристики цього сигналу; [77, 92, 111, 115, 122] – розробка методики опрацювання сигналів вихрострумowego перетворювача в імпульсному режимі збудження з аналізом цих сигналів в часовій області на основі використання перетворення Гільберта; [97, 114] – аналіз похибок визначення інформативних параметрів сигналів вихрострумowego перетворювача з імпульсним

збудженням. Також автором проведені необхідні експериментальні дослідження, що знайшли своє відображення в [76, 95, 113, 116].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи” (м. Київ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (м. Созополь, Болгарія, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2011, 2013, 2015); національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2012» (м. Київ, 2012), «Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2016» (м. Київ, 2016); європейській конференції «11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)» (м. Прага, Чеська Республіка, 2014); світовій конференції «19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)» (м. Мюнхен, Німеччина, 2016); міжнародних науково-технічних конференціях «Приборостроение-2015» та «Приборостроение-2016» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2015, 2016); міжнародній науково-технічній конференції IEEE «Електротехніка та комп'ютерна інженерія» (IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, «UKRCON 2017») (м. Київ, 2017).

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 30 наукових праць, з яких 4 у фахових виданнях України та 7 у закордонних виданнях (в тому числі 1, що входить до науково-метричної бази Scopus), 2 патенти України, 17 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАСАД ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

В даному розділі наведено стислий огляд наукових праць, які стосуються методів вихрострумowego неруйнівного контролю (ВСНК) та їх практичної реалізації на сучасному етапі розвитку науки і техніки. Особлива увага приділена питанням розвитку способів підвищення достовірності контролю та способів зменшення впливу завад і різних перешкоджаючих факторів на результати контролю, розширення функціональних можливостей ВСНК, аналізу різних способів збудження вихрових струмів. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів аналізу сигналів вихрострумowego перетворювача (ВСП) та визначення залежностей інформативних параметрів від характеристик та параметрів об'єктів контролю (ОК). На основі зробленого огляду сформульовані мета та завдання дослідження, що покладені в основу даної роботи.

1.1. Загальні положення та сучасні вимоги до вихрострумowego контролю

Застосування методів та засобів неруйнівного контролю має винятково важливе значення в системі управління якістю продукції та гарантуванні безпечної експлуатації складних технічних об'єктів, деталей та матеріалів. Згідно попередніх досліджень [1], оцінювання якості виробів, деталей, вузлів складає близько 5-20% їх загальної вартості, в той час як відсутність контролю та перевірки в багатьох випадках призводить до значно більших втрат, які викликані як заміною ненадійних, небезпечних чи пошкоджених

виробів, деталей, вузлів, так і на ліквідацію небажаних наслідків їх експлуатації. Існують випадки, коли експлуатація виробів з дефектами може призвести до катастрофічних наслідків і створити загрозу людському життю.

Важливе місце серед інших відомих методів неруйнівного контролю (НК) виробів з електропровідних матеріалів займають вихрострумові методи НК. Ці методи мають певні переваги, зокрема високу інформативність та надійність, відсутність механічного контакту з ОК. Методи ВСНК дозволяють виявити тріщини та корозійні пошкодження в деталях складних систем, зміни фізико-механічних параметрів матеріалів ОК, порушення захисних покриттів, зміну лінійних та кутових характеристик виробів в процесі їх експлуатації, тощо [1, 2].

Принцип вихрострумового методу НК базується на збудженні в ОК з електропровідного матеріалу вихрових струмів за допомогою змінного електромагнітного поля. Зазвичай це поле створюється електричною котушкою. Характер і розподіл згенерованих вихрових струмів залежить від геометричних параметрів ОК (товщини, форми), наявності дефектів (тріщин, небажаних включень) і їх характеристик, питомої електропровідності матеріалу, магнітної проникності, взаємного розташування котушки і ОК, частоти і форми струму збудження та інш [2]. Породжене електромагнітне поле, яке містить інформацію про вищевказані параметри ОК, перетворюється у вимірювальний сигнал за допомогою одного з відомих способів [1, 2, 3], наприклад додаткової вторинної котушки. Аналіз інформативних параметрів цих сигналів (амплітуда, початкова фаза, комплексний опір, тощо) дозволяє оцінити вищезазначені характеристики та параметри ОК, а також характеристики можливих дефектів у ньому.

Зміни фізико механічних характеристик і параметрів ОК, і в першу чергу питомої електропровідності і магнітної проникності матеріалу пов'язані з його складом та структурою, параметрами стану, які впливають на фізико-

механічні характеристики матеріалу. Всі ці параметри та характеристики ОК дають свій внесок у електромагнітне поле, яке фіксується вторинною (приймаючою) котушкою, сигнал якої містить інформацію про вищезгадані параметри ОК. Виходячи з цього ВСНК вважають багатопараметровим, що є його особливістю та пояснює важливість і необхідність розвитку не тільки методів і засобів, але й спеціальних методик виділення та аналізу інформації, підвищення селективності контролю певного параметру [3].

Одним з найважливіших параметрів ВСНК, який обмежує його використання, є глибина проникнення вихрових струмів δ . Встановлено, що цей параметр характеризує загасання плоскої електромагнітної хвилі в електропровідному ОК і залежить від електрофізичних параметрів матеріалу ОК та частоти збудження електромагнітного поля [4]:

$$\delta = \sqrt{2 / (\omega \sigma \mu_0 \gamma \mu^*)}, \quad (1.1)$$

де ω – кутова частота сигналу, $\omega = 2\pi f$, f – циклічна частота сигналу; σ – питома електропровідність матеріалу ОК; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м, μ^* – відносна магнітна проникність матеріалу ОК. Дослідження глибини проникнення [5] показали, що на неї доволі суттєво впливають діаметри обмоток ВСП, товщина зазору між ОК і ВСП, зміщення ВСП до краю ОК. В роботі [6] запропоновано ввести поняття реальної глибини проникання вихрових струмів, яка є доволі складною функцією багатьох аргументів. Уточнюючи зміст поняття глибини проникнення вихрових струмів дослідники дійшли висновку, що цей параметр має зв'язок з мінімальною товщиною ОК і може бути меншим в 2,8 разів від розрахованого значення. Також було встановлено, що така глибина є ефективною глибиною проникання вихрових струмів. На сьогодні існує ряд задач контролю тонкостінних ОК, для яких глибина проникнення вихрових струмів значно перевищує товщину ОК, в той час як розподіл вихрових струмів залежить від неї.

Дослідниками також встановлено, що вихідний сигнал вихрострумowego перетворювача залежить і від режиму контролю [7]. Зважаючи на це ВСП поділяють за робочим положенням відносно ОК (накладні, прохідні, екранні, комбіновані), типом перетворення параметрів ОК у вимірювану вихідну величину (трансформаторні, параметричні), залежно від способу з'єднання обмоток котушок (абсолютні, диференціальній).

З розвитком технологій стало можливим використання індуктивних ВСП складної конструкції (мультидиференціальні, площинні, плівкові та інш.), а також використання датчиків електромагнітного поля таких, як магнітні сенсори, основані на низькотемпературній надпровідності, і магніторезистори [8]. Головною метою застосування останніх є отримання високої чутливості при роботі на низьких частотах, що обумовлює збільшення глибини проникнення [9]. Проте будь яке ускладнення конструкцій перетворювачів впливає на ступінь складності налаштування та калібрування таких датчиків.

У сучасному вихрострумовому НК виділяють декілька найголовніших проблем, що потребують вирішення: одночасний контроль декількох параметрів ОК з можливістю їх чіткого відокремлення один від одного, можливість зменшення впливу заважаючих факторів на контроль одного параметру. Для вирішення цих задач можна застосувати спосіб виділення частини сигналу ВСП, що відповідає зв'язку з контрольованими параметрами. Це обумовлює необхідність розроблення і дослідження методів зменшення впливу завад на сигнали ВСП і методів аналізу сигналу перетворювачів.

1.2. Огляд методів та засобів аналізу інформації у вихрострумовому контролі

Одним з важливих напрямів розвитку ВСНК є підвищення інформативності контролю [3]. Його реалізація здійснюється за рахунок удосконалення способів збудження вихрострумового поля, застосування нових методів аналізу експериментальних даних і пошуку нових інформативних параметрів сигналів ВСП.

Найвживаніші методи ВСНК ґрунтуються на використанні гармонічних сигналів для збудження електромагнітного поля і оцінювання електрофізичних та механічних характеристик ОК та аналізі таких інформативних параметрів, як амплітуда і фазовий зсув прийнятих сигналів (або ортогональні складові сигналів у разі їх представлення на комплексній площині) відносно сигналу збудження [4, 10]. В практику ВСНК все частіше включають й інші методи ВСНК для комплексного оцінювання характеристик ОК, наприклад методи, які ґрунтуються на імпульсному збудженні вихрових струмів [11].

1.2.1. Методи контролю з гармонічним збудженням вихрових струмів

У вихрострумовому неруйнівному контролі залежність інформативних параметрів інформаційного сигналу ВСП від параметрів та характеристик ОК дуже часто описується складною та нелінійною функцією. Через це дуже складно визначити та оцінити взаємний вплив параметрів системи ВСП-ОК на вимірювальний інформаційний сигнал [3]. Зазвичай з метою визначення деяких з цих параметрів, вдаються до заходів які зменшують вплив інших заважаючих, але неважливих для вимірювання чи контролю параметрів, або ж до їх стабілізації в певних умовах та режимах проведення контролю. На

сьогодні розрізняють одно-й та багатопараметровий методи виділення інформації [12].

1.2.1.1. Двопараметровий метод вихрострумowego контролю

Вихрострумний НК на початку свого розвитку мав доволі просту реалізацію: в процесі проведення контролю використовували одну робочу частоту і проводили аналіз вихідного сигналу ВСП. Через те, що сигнал мав комплексну форму, аналіз проводили за його амплітудними та фазовими параметрами (або одним з них у разі однопараметрового контролю), тобто за двома параметрами проводили оцінювання вихідного сигналу. Такий спосіб одночастотного двопараметрового контролю дозволяв зменшити вплив заважаючих факторів. Згодом стали використовувати окремо амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий та модуляційний способи [3, 13].

При амплітудному способі контролю необхідно було обрати на основі розрахунку узагальненого параметру [1, 4] певний режим контролю, за якого б вплив заважаючого фактора на амплітуду вихідного сигналу був мінімальним. У цьому випадку для зменшення впливу заважаючого фактора годограф повинен бути у вигляді дуги, радіус якої регламентується початковим значенням внесеної напруги (рис. 1.1). Для цього до вектора сигналу ВСП додають вектор компенсуючого сигналу, зміщуючи в такий спосіб початок координат у необхідну точку комплексної площини. При контролі тріщин в ОК таким заважаючим фактором може бути вплив параметрів матеріалу ОК, тому виконується калібрування, яке допомагає формувати компенсаційну напругу. Таке використання компенсаційного сигналу називають «перенесенням початку координат». За рахунок використання вектора сигналу компенсації є можливість виявити вектор зміни вихідного параметру, що є залежним тільки від контрольованих параметрів чи характеристик ОК [3, 4, 12].

У випадку фазового способу контролю потрібно підібрати режим, який би мав мінімальний вплив завад на фазову характеристику сигналу. Для цього формують компенсаційний сигнал, аналогічно амплітудному способу, проте необхідно враховувати зміну заважаючого параметру. При цьому за рахунок додавання вектора компенсуючого сигналу до вектора сигналу ВСП початок координат зміщують таким чином, щоб при зміні заважаючого параметра вектор результуючого сигналу зміщувався б перпендикулярно дотичній в початковій точці (в точці на комплексній площині, що відповідає початку координат в новій системі відліку) на годографі (рис. 1.2). При більш детальному вивченні такої проблеми вчені запропонували її часткове вирішення за рахунок використання такого компенсаційного сигналу, який би змінювався залежно від набіга фази, і такий спосіб названо способом динамічної компенсації [12, 14].

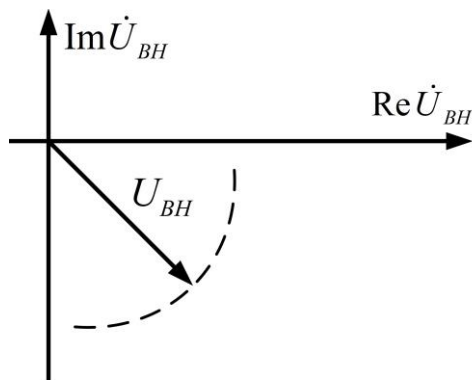


Рис. 1.1. Годограф заважаючого параметра при амплітудному способі ВСНК

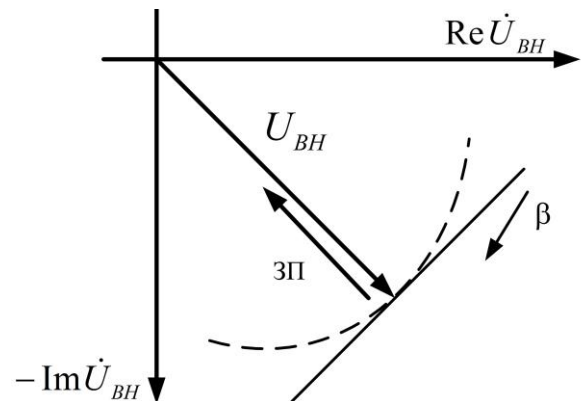


Рис. 1.2. Годограф заважаючого параметра (ЗП) при фазовому способі ВСНК

Іншим способом двопараметрового вихрострумового НК є амплітудно-фазовий спосіб. Він ґрунтується на виборі такого режиму контролю, за якого інформаційний сигнал визначають за допомогою методу проєкцій внесеної напруги на вибраний напрямок на комплексній площині представлення внесеної напруги, що визначається вектором опорної напруги (рис. 1.3). Умовою зменшення впливу завади є ортогональність її годографа (рис. 1.3,

годограф а) та вектора додаткового напрямку опорної напруги. При реалізації такого способу використовують фазочутливі детектори, опорна напруга яких підстроюється фазообертачами. Таким чином для зменшення впливу завад і збільшення чутливості інформаційного сигналу до контрольованого параметру необхідно, щоби вектор контрольованого параметру і заважаючого були ортогональними [4]. Досліджуючи такий спосіб аналізу інформаційного сигналу, автори [15] дійшли висновку, що на практиці користуватись цим способом можна лише за умови зменшення впливу завади для всіх заважаючих параметрів. Зокрема, в роботі [16] дослідники наголошують, що зменшення впливу всіх заважаючих параметрів призводить до значних складностей в процесі контролю декількох параметрів і обумовлює внесення похибок.

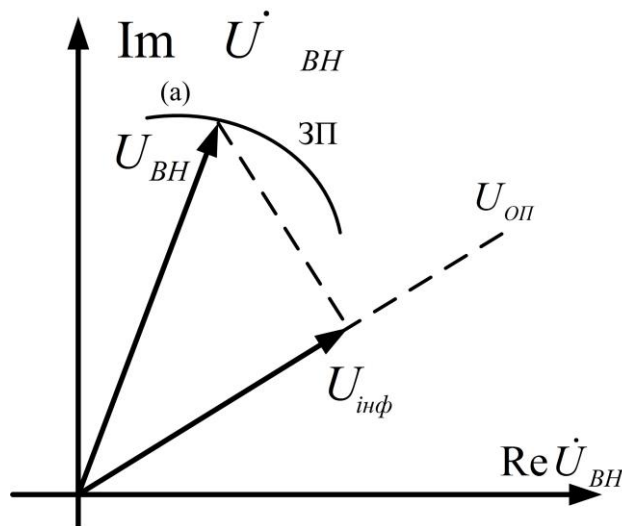


Рис. 1.3. Годограф сигналу при амплітудно-фазовому способі ВСНК

Модуляційний спосіб ВСНК ґрунтується на просторовому розділенні характеристик ОК і просторового спектра сигналу від заважаючого та контрольованого параметрів при взаємному русі ОК та ВСП [12]. В процесі аналізу сигналу намагаються виділити частину спектру імпульсу обвідної сигналу ВСП, яка відповідає характеристикам контрольованого параметру. Якщо в матеріалі ОК є тріщина, то вона відображатиметься короткими імпульсами з широкочастотним спектром. Такі параметри та характеристики

ОК як електропровідність, повітряні включення – в процесі контролю відображатиметься у вигляді плавної зміни параметрів сигналу ВСП і сформують тривалий імпульс [2]. Для запобігання впливу завади в цьому методі рекомендують застосовувати фільтрацію певних частин спектру, адже спектр обвідної сигналу ВСП має різні складові.

Процес аналізу інформаційного сигналу ВСП й інтерпретації результатів контролю ґрунтується на детальному аналізі впливу дефекту та його параметрів на сигнал перетворювача. Прикладом такого аналізу може бути дослідження, представлене в роботі [17]. Автором аналізувався вид та форма сигналу диференційного ВСП при скануванні вздовж труби, а також вивчалась залежність сигналу від параметрів дефекту в певних характерних точках, які можна визначити в процесі проведення контролю. Такими точками можуть бути точки з максимальною амплітудою інформаційного сигналу ВСП з максимальним впливом дефекту на нього. При використанні диференційних ВСП координати точок максимальної амплітуди сигналу ВСП будуть залежати від довжини тріщини. Проте, для аналізу впливу параметрів тріщини в процесі проведення розрахунків зручніше використовувати абсолютний ВСП, оскільки максимальна амплітуда сигналу буде відповідати положенню дефекту точно під центром перетворювача. На основі проведеного в роботі [17] моделювання, можна зробити висновок, що для знаходження дефектів в трубах достатньо проводити аналіз сигналу перетворювача в комплексній площині або розподілу амплітуди сигналу. Проте, для визначення глибини та товщини труби додатково необхідно проводити і аналіз фази сигналу. З огляду на викладене вище, для отримання більш повної інформації стосовно характеристик і параметрів ОК необхідно застосовувати декілька методик виділення корисної інформації з сигналів ВСП.

Одним із нових способів аналізу інформаційного сигналу ВСП є метод з використанням дискретного вейвлет-перетворення. В роботі [18] описано реалізацію дискретного вейвлет-перетворення, яка базується на розділенні

сигналу на низькочастотну та високочастотну частини за допомогою квадратурних фільтрів. Такий спосіб аналізу сигналу дає можливість отримання сигналів, параметри яких відповідатимуть дефектам, проте цей метод є досить трудомістким і потребує застосування спеціальних алгоритмів масштабування, оскільки сигнали, що відповідають дефектам, повинні бути приведені до однакової тривалості.

1.2.1.2. Багатопараметровий метод вихрострумового контролю

Багатопараметровий метод ВСНК винайдений досить давно в результаті розроблення широкополосних методів контролю [19]. Інтерес до цього методу пояснюється новими задачами в області контролю якості продукції і новими можливостями в сфері аналізу інформаційних сигналів [20]. Процес багатопараметрового виділення інформації поділяють на певні етапи: отримання багатовимірного сигналу; первинна обробка багатовимірного сигналу (включає в себе використання набору вимірних параметрів багатовимірного сигналу і вимірювання певного набору параметрів цього сигналу); вторинна обробка багатовимірного сигналу (використання набору вимірних параметрів багатовимірного сигналу для характеристики параметру ОК) [12].

Синусоїдний сигнал, що є характерним для вихрострумових приладів, для фіксованої частоти має дві степені свободи та характеризується лише двома інформативними параметрами (амплітудою та фазою, або двома ортогональними складовими). Для того, щоби збільшити інформаційну ємність сигналу, необхідно розширити його спектральний склад (перейти до несинусоїдальних сигналів), або одночасно аналізувати декілька незалежних синусоїдальних сигналів, або ж використовувати модульовані сигнали [20]. Перехід до несинусоїдних сигналів реалізують декількома способами, що і

використовується в структуроскопії та дефектоскопії. Зокрема в структуроскопії застосовують наступні способи отримання сигналів:

- за рахунок нелінійних властивостей матеріалу ОК (метод високих гармонік, метод з вимірюванням параметрів динамічної петлі гістерезису, осцилографічний метод та інш.), а також одночасному підмагніченні постійним магнітним полем різної інтенсивності (метод парних гармонік);
- за рахунок стрибків намагніченості під час плавної зміни зовнішнього поля (метод магнітних шумів);
- за рахунок несинусоїдального (наприклад, імпульсного) збудження ВСП – імпульсний спосіб ВСНК;
- за рахунок одночасного збудження первинного перетворювача синусоїдальними струмами декількох частот (багаточастотний метод).

В дефектоскопії перехід до несинусоїдальних сигналів реалізується магніто-індукційним способом. В цьому випадку сигнал у вигляді імпульсу е.р.с. виникає при проходженні індукційного первинного перетворювача над дефектом в процесі скануванні намагніченої поверхні ОК. Форма, довжина і величина цього імпульсу визначається інтенсивністю і просторовою конфігурацією полів розсіяння дефекта, які пов'язані з розмірами, геометрією та глибиною залягання цього дефекту.

Одночасний аналіз декількох незалежних синусоїдальних сигналів широко застосовують в структуроскопії, а аналіз модульованих сигналів – в структуроскопії та дефектоскопії. В останньому відбувається модуляція несучої за рахунок зміни властивостей та параметрів ОК в процесі сканування його поверхні. Цілком зрозуміло, що модуляція може бути викликана не тільки наявністю дефектів типу порушення суцільності, а й локальними структурними неоднорідностями і коливаннями величини зазору. При збудженні ВСП струмом певної фіксованої частоти виникає амплітудна та фазова модуляція вихідної напруги ВСП. Сигнали з

амплітудною модуляцією застосовують досить часто, особливо в перетворювачах ферозондового типу.

В залежності від виду вимірюного багатовимірного сигналу використовують різні способи його аналізу. Метою такого аналізу є виділення корисного сигналу з їх адитивної суміші з шумами, вимірювання сукупності незалежних параметрів багатовимірного сигналу, що характеризують властивості та параметри ОК. Подібний аналіз сигналу прийнято назвати параметризацією сигналу. Проте не всі способи аналізу інформаційного сигналу закінчуються параметризацією, і тому деякі з них використовуються для відокремлення інформаційного сигналу від завад різного виду, виділення інформативних параметрів сигналу, розділення сигналу на складові тощо. У таких випадках використовують комбінацію декількох методів аналізу сигналу ВСП, результатами чого повинна бути обов'язкова параметризація.

На сьогодні найпоширенішою первинною обробкою вихідного сигналу ВСП є амплітудне, фазове, амплітудно-фазове детектування або ж сукупність частотної селекції та одного з перелічених детектувань. Частотне детектування (вимірювання частоти) застосовують в автогенераторних схемах включення ВСП [21]. Детектування модуляційних сигналів не призводить до їх параметризації, а лише виділяє їх обвідну. Через це після детектування обов'язково використовують інші методи обробки сигналу. Те саме відбувається й за умови використання частотної фільтрації, амплітудної дискримінації, функцією яких є виділення інформаційного сигналу з поміж шумів [20].

Іншим первинною обробкою є стробування. У випадку синусоїдних сигналів його виконують з метою амплітудно-фазового детектування. Проте широке застосування стробування набуло в обробці несинусоїдних сигналів – в багаточастотному методі при синхронізації частотних складових, в

імпульсному ВСНК. Значно рідше стробування застосовують для виділення параметрів сигналу, зв'язаних з характеристиками та параметрами ОК [13].

До найскладніших методів первинної обробки інформаційних сигналів ВСП належить спектрально-кореляційний аналіз. Такий аналіз можна застосовувати до неперервних, імпульсних несинусоїдних та випадкових сигналів. Цей метод оснований на розкладенні сигналу на ортогональні складові та визначенні числових значень їх коефіцієнтів. Окремим випадком є розкладення сигналу в ряд Фур'є. Головною перевагою спектрально-кореляційного аналізу є отримання сукупності незалежних інформативних параметрів. На сьогодні цей метод не дозволяє досягнути достатньої точності і не дає інформації про параметри та характеристики ОК за умови проведення аналізу сигналу перетворювача на невеликих інтервалах часу під час руху ВСП відносно ОК.

Бажаним результатом будь якого методу аналізу сигналів ВСП прийнято вважати кількісне значення параметру та характеристики ОК. Отримати такий результат в багатопараметровому методі виділення інформації можливо за рахунок використання певних обчислювальних операцій, завданням яких є представлення результатів у зручному для подальшого аналізу вигляді [12, 22]. Отже, даний спосіб не вирішує задач аналізу сигналу в повному обсязі, а залишає виконання заключного етапу аналізу результатів контролю оператору чи дефектоскопісту.

Багатопараметровий метод ВСНК поділяється на імпульсний та багаточастотний. Особливістю імпульсного способу є наявність у вихідному сигналі ВСП вузлових точок, в яких досягається компенсація впливу зазору. За цими точками будують інформаційний сигнал з компенсацією в широкому інтервалі його змін. В багаточастотних способах ВСНК для компенсації впливу заважаючих факторів використовують сигнал ВСП на допоміжній частоті. Формування інформаційного сигналу проводиться різними методами: підсумовуванням сигналів на змінному струмі, перетворенням у

сигнали допоміжної частоти, додаванням на постійному струмі, перетворенням внесеної напруги основної та допоміжної частоти з їх часовим розділенням [23, 24, 25]. Проте тільки метод формування інформаційного сигналу через векторну суму сигналів основної та допоміжної частоти дозволяє використовувати для контролю обидва інформативні параметри сигналу основної частоти.

Метод багатопараметрового контролю можна представити як узагальнення методу фазової дискримінації, який застосовується одночасно на двох і більше частотах. Після додавання сигналу другої частоти, теоретично існує можливість реалізувати 4-х параметровий контроль. Розширення контролю до чотирьох або більше параметрів складно відтворити графічно, але воно може легко сприйматися як логічне збільшення числа змінних та розмірності простору контрольованих параметрів ОК [13]. Задача визначення параметрів ОК по сигналам ВСП не може бути вирішена аналітично в загальному вигляді. В таких випадках використовують методи тестових зразків, характеристики та параметри яких відомі. За серією таких зразків визначають реакцію системи, за якою методами інтерполяції визначають функціональну залежність між характеристиками сигналу та ОК [26, 27, 28]. Також відомі окремі рішення коли складні аналітичні залежності між параметрами ОК і сигналами ВСП спрощували [29].

На сьогодні для вирішення задач багатопараметрового контролю відомо вже багато чисельних методів і алгоритмів для аналізу сигналів [30, 31, 32, 33]. В основі кожного з них лежить використання чисельних алгоритмів, розроблених вченими ще в 80-х з використанням спеціалізованого сучасного математичного забезпечення – Matlab, Comsol, Elcut, Ansys та інш. Проте досі актуальними залишаються питання організації багатопараметрового контролю та обробки його сигналів, що містять складну залежність від параметрів та характеристик від ОК, та підвищення точності вимірювання.

1.2.2 Методи контролю з імпульсним збудженням вихрових струмів

Головною причиною використання перших імпульсних вихрових струмів була необхідність підвищення чутливості вихрострумowego методу з традиційним гармонічним збудженням та складнощі аналізу результатів контролю через присутність вищих гармонік в сигналах ВСП.

В загальному випадку ВСНК з імпульсним збудженням ВСП базується на визначенні миттєвих значень сигналу цього перетворювача та аналізі певних моментів часу, що визначаються від початку збуджуючого імпульсу. В процесі контролю параметри та характеристики ОК призводять до зміни величини сигналу ВСП – його амплітуди та тривалості. Наприклад, про параметри та характеристики ОК можна робити висновок за положенням вузлової точки, тобто моментом часу, коли зафіксована мінімальна зміна амплітуди сигналу ВСП на ділянці ОК [34, 35]. В такому випадку необхідно попередньо виконувати сканування на тестових ОК з заздалегідь відомими параметрами та характеристиками для побудови залежності контрольованого параметру від часового положення вузлової точки. Крім того, використання вузлової точки в якості інформативного параметру призводить до суттєвої похибки вимірювання параметрів та характеристик ОК через вплив завад.

В перших експериментах з імпульсного ВСНК [13, 36] було проаналізовано застосування імпульсного режиму збудження для контролю товщини металевого покриття на металевій основі. Експериментальна система складалася з імпульсного генератора для збудження мостової схеми, двох однакових перетворювачах та осцилографа для візуалізації та аналізу результату. Один з перетворювачів розміщували на еталонному об'єкті, інший – на ОК. Оцінювання результату проводилося шляхом визначення горизонтального зміщення вузлової точки траєкторії променя осцилографа. В ході цього експерименту також було виявлено, що внаслідок зміни зазору

між ВСП та ОК змінювався нахил кривої на екрані осцилографа. Таким чином, впливом зазору можна знехтувати за умови незмінного нахилу кривої.

Разом з тим було проведено теоретичний аналіз проходження електромагнітної хвилі через межу поділу повітря - метал. Розрахований інформаційний сигнал (відбитий імпульс) мав дві складові, одна з яких враховувала відбиття від межі повітря – метал та не представляла інтересу на думку вчених, а інша – відбиття від метал-метал і містила інформацію про товщину покриття.

Для виявлення зазначеної другої складової, що містить дані про межу поділу метал – метал, було проведено процедуру балансування складових сигналів обох ВСП шляхом використання мостової схеми. Процес балансування мостової схеми та конструкції перетворювачів приведені в роботі [37]. Використані в цьому експерименті перетворювачі складались з соленоїдної обмотки на феритовому стрижні з циліндричним феритовим корпусом навколо соленоїда. Центральний феритовий стрижень виконано з двох частин, розділених повітряним прошарком. Зміна відстані між цими двома частинами стрижня використовувалась при балансуванні мостової схеми.

З метою вивчення впливу зазору між ВСП та ОК в роботі [38] проведено детальний аналіз подібних вузлових точок. Встановлено, що теоретично існує нескінченна їх кількість, проте експериментально змогли отримати лише три. На рис. 1.4 приведено результати контролю товщини металевого покриття на металевій основі, де відображено дві вузлові точки. На даних осцилограмах видно зміщення вузлових точок зі зміною товщини покриття. Середня осцилограма відповідає покриттю h , верхня – покриттю $2h$, нижня – $4h$. Різні криві, показані на кожній осцилограмі, відповідають різній величині зазору між ВСП та ОК.

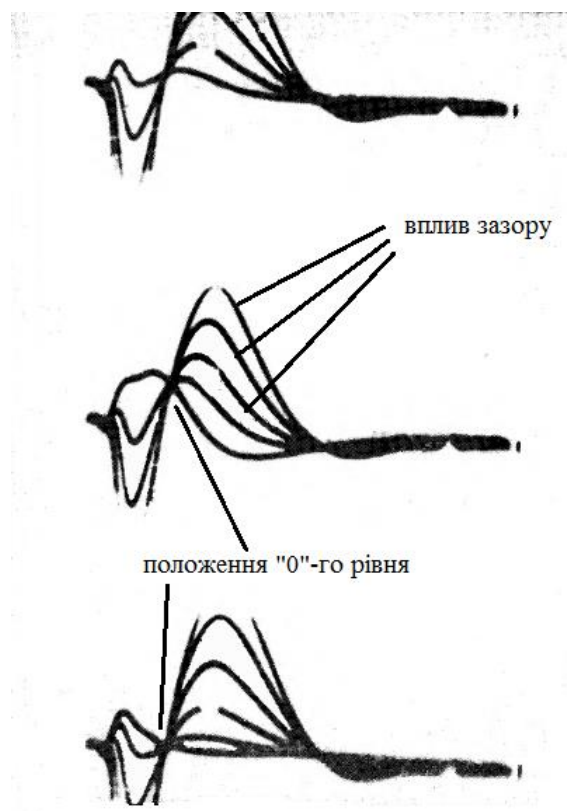


Рис. 1.4. Фотографія осцилограми зі зміщенням вузлових точок при зміні товщини покриття за даними [38]

Подальші роботи вчених присвячені розробленню систем, які б одночасно визначали відстань між ВСП та ОК і надавали інформацію про параметри та характеристики ОК [13]. Наприклад в роботах [39, 40] описано систему, що базується на використанні імпульсу малої довжини для отримання інформації про величину відстані між перетворювачем та ОК та імпульсу значно більшої довжини для проникнення в металевий об'єкт з метою отримання інформації про можливі дефекти. Функціональна схема такої системи показана на рис. 1.5.

Розроблена система складається з генератора змінної частоти, управління яким здійснювалось за допомогою пікоподібної напруги. Через те, що глибина проникнення вихрових струмів змінюється обернено пропорційно кореню квадратному від частоти, опір, внесений металом в контур генератора, змінюється з частотою. Генератор було відрегульовано таким чином, що коливання зривались, коли внесений опір ставав дуже

великим. Таким чином, час, за який генератор виробляв коливання за один період пікоподібної напруги, було використано в якості міри товщини покриття.

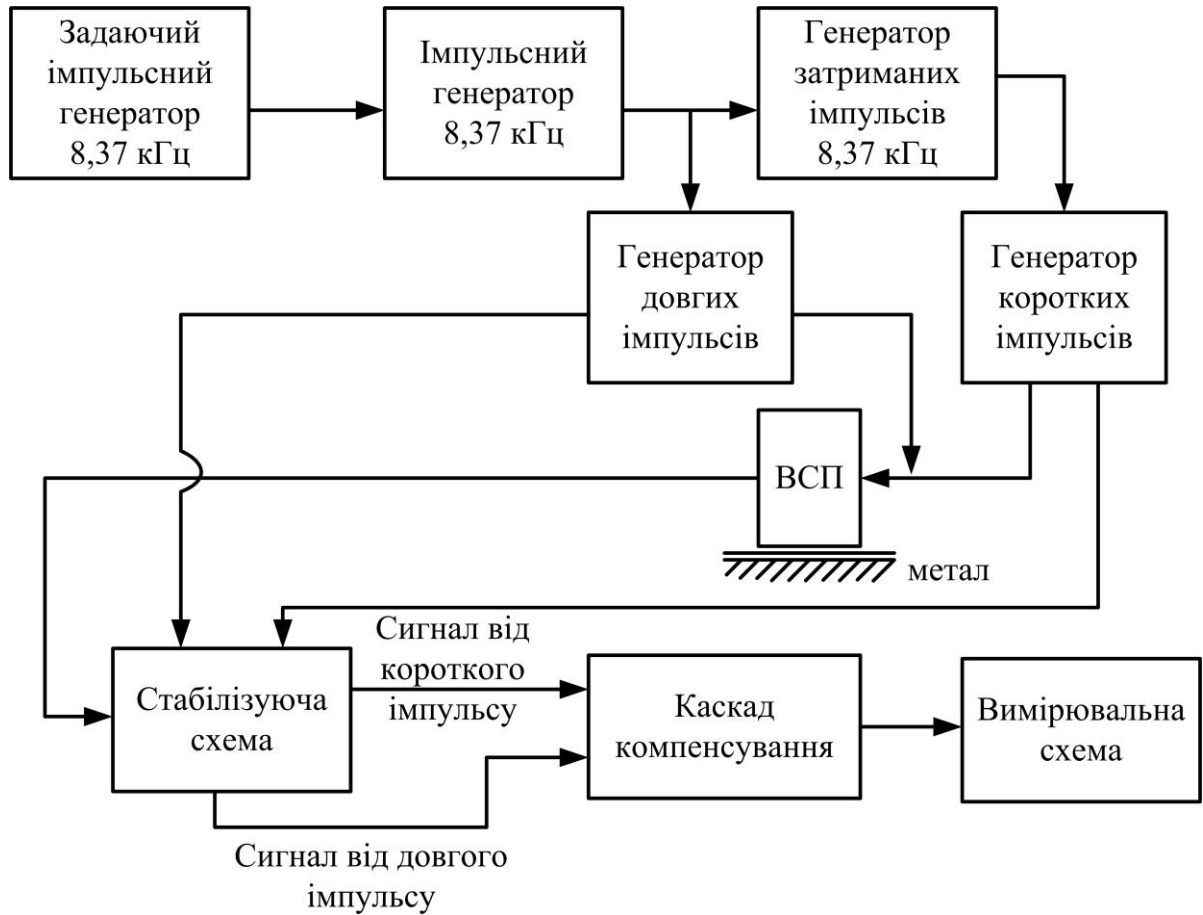


Рис. 1.5. Структурна схема двоімпульсної системи

Для підвищення точності вимірювання таких параметрів ОК як електропровідність та товщина ОК дослідниками було запропоновано імпульсний індукційний спосіб [41], в якому вихрові струми збуджувались за рахунок імпульсу напруженості поля виду $t^n \cdot I(t)$, де t - час, $n = 0$ або 1 , $I(t)$ - одинична функція. Висновки про значення контрольованого параметру ОК робили за інтервалом часу від початку імпульсу до моменту досягнення ним певного порогового рівня.

В умовах проведення контролю протяжних об'єктів даним способом залежність амплітудно-часової характеристики сигналу перетворювача від контрольованих параметрів має вигляд:

$$U_c = k \cdot f_1\left(\frac{h}{D}\right) \cdot f_2\left(\frac{t}{\lambda}\right), \quad (1.2)$$

де U_c – напруга електричного сигналу, $\lambda = D^2 \mu_0 \sigma$, σ – електропровідність матеріалу ОК, h – значення зазору між перетворювачем та ОК або товщина діелектричного покриття матеріалу ОК, D – середній діаметр перетворювача, μ_0 – магнітна проникність вакуума, k – постійний коефіцієнт. На рис. 1.6 подана нормована амплітудно-часова залежність $f_2\left(\frac{t}{\lambda}\right)$ сигналу перетворювача від узагальненого параметру часу. Залежність 1 на рис. 1.6 має місце тільки тоді, коли параметри ОК не впливають на збуджуюче поле. У такому випадку значення товщини h можна виміряти за величиною сигналу в початковий момент часу.

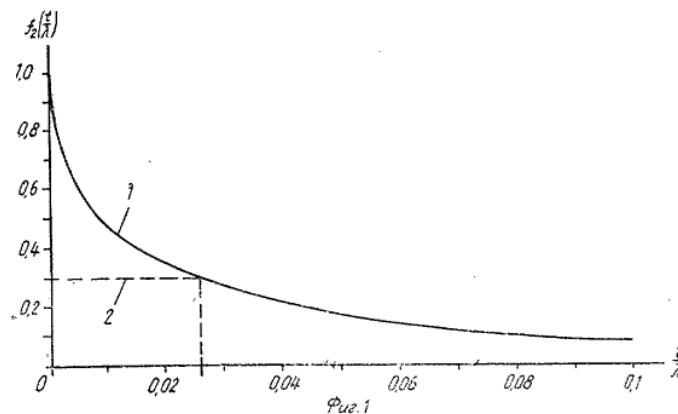


Рис. 1.6. Нормована амплітудно-часова залежність сигналу від узагальненого параметру часу

Вимірювання електропровідності згідно [41] проводять за інтервалом часу між початковим моментом та моментом коли напруга електричного сигналу U_c досягне заздалегідь заданого порогового рівня 2 (рис. 1.6), який відповідає певній частині від максимального значення напруги. Якщо пороговий рівень $a = 0.3$, то узагальнений параметр дорівнює:

$$\frac{t}{\lambda} = \frac{t}{D^2 \mu_0 \sigma} = 0,026 \quad (1.3)$$

Виходячи з (1.3), можна знайти електропровідність матеріалу ОК:

$$\sigma = \frac{t}{0,026 \cdot D^2 \mu_0} \quad (1.4)$$

На рис. 1.7 приведено результати вимірювання товщини тонких в порівнянні з діаметром перетворювача провідних алюмінієвих листів.

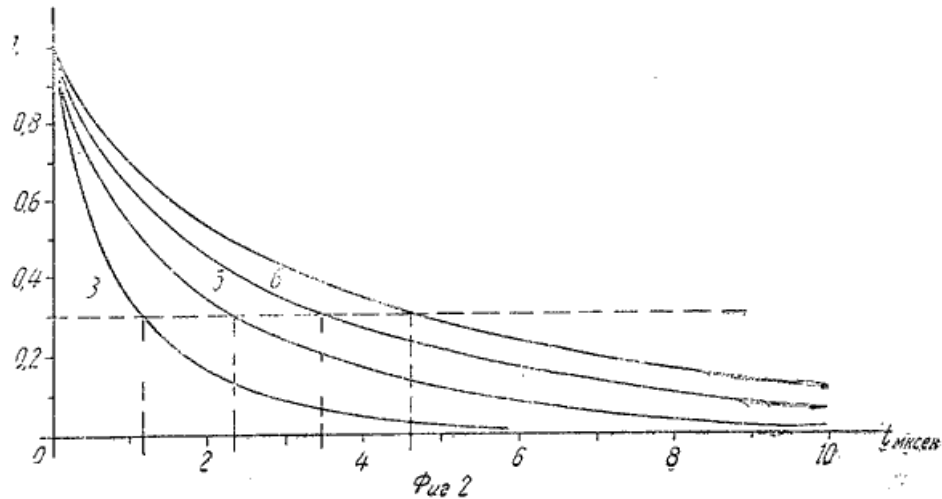


Рис. 1.7. Нормована залежність сигналу від функції часу для різних значень товщини ОК

При такому способі вимірювання товщини ОК можливе виникнення похибки за рахунок варіації електропровідності ОК, а одночасний контроль цих параметрів ОК даним способом є неможливим. З метою вирішення такої проблеми було запропоновано інший спосіб імпульсної товщинометрії феромагнітних труб, описаний в роботі [42]. Цей спосіб базується на використанні вихрострумowego перетворювача 2 (рис. 1.8), до складу якого входять дві вимірювальні котушки 4 та 5 різного діаметру, а також збуджуюча - 3. Усі котушки ВСП розміщені коаксіально, а відстань між кожною з вимірювальних та збуджуючою однокові. Сигнал з генератора прямокутних імпульсів 1 потрапляє на збуджуючу котушку 3, яка в свою чергу створює імпульс прямокутної форми магнітного поля. За допомогою вимірювальних котушок 4 та 5, компенсаторів 6 та 7, інтегруючих блоків 8 та 9, нормуючих блоків 10 та 11 отримують сигнали, що відповідають зміні

магнітного потоку з урахуванням впливу вихрових струмів в ОК. В блоці 12 відбувається порівняння сигналів вимірювальних котушок. У випадку співпадання обох сигналів, визначається амплітуда одного з них у блоці 14 та виводиться на реєстратор 15. Синхронізація процесу вимірювання забезпечується блоком стробування 13.

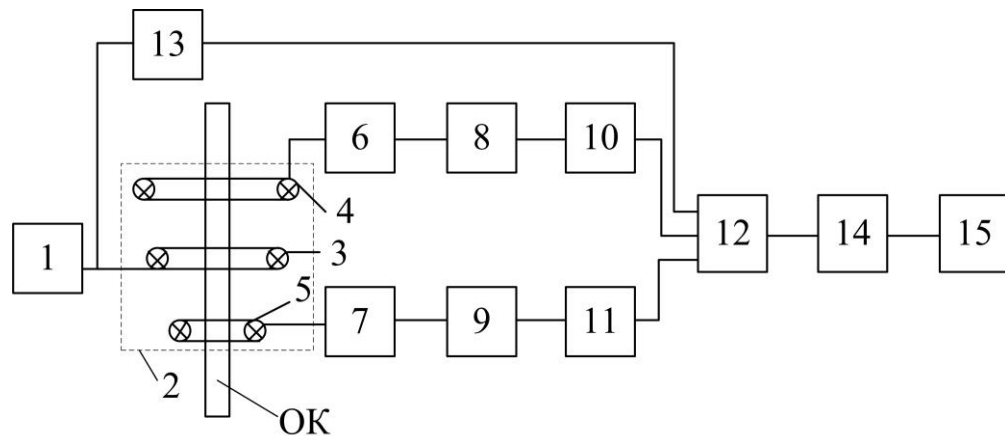


Рис.1.8. Структурна схема приладу для вимірювання товщини стінок ферромагнітних труб

Одна з ранніх спроб аналізу та обґрунтування імпульсного багатопараметрового електромагнітного контролю була зроблена в роботі [43]. Автором було запропоновано використання залежності зміни параметрів сигналів вимірювального перетворювача з імпульсним збудженням від зміни параметрів ОК з метою отримання багатопараметрових інформаційних сигналів та наступним визначенням функціональних залежностей параметрів сигналу від конкретного параметру ОК. Даний спосіб ґрунтується на використанні певної кількості характерних точок сигналів ВСП – максимальних та середніх значень напруг на певних інтервалах часу. Запропонований спосіб характеризується простотою реалізації, але алгоритм опрацювання інформаційного сигналу перетворювача передбачає складну процедуру виділення часових проміжків для аналізу миттєвих значень інформаційного сигналу ВСП.

Детальний математичний аналіз впливу металевого середовища на електромагнітне поле витка зі струмом у вигляді послідових радіоімпульсів розглянуто в роботі [44]. Авторами детально проаналізовано вплив електропровідності матеріалу на форму сигналу ВСП в умовах його збудження імпульсом з високочастотним заповненням. За результатами їх роботи видно, що ВСНК з імпульсним збудженням може бути застосований для контролю локальних ділянок ОК на глибині більшій чим це можливо за традиційного методу ВСНК.

Застосування в засобах ВСНК сучасних цифрових методів обробки інформативних параметрів сигналів дозволяє підвищити їх ефективність і розширити функціональні можливості. Так в роботі [45] розглянуто спільне використання гармонічного і імпульсного режимів збудження електромагнітного поля при контролі стінок труби з метою збільшення числа контрольованих характеристик ОК. Позитивний ефект досягається за рахунок використання під час аналізу інформаційного сигналу вихрострумowego перетворювача інформативних параметрів, таких як значення амплітуди сигналу ВСП і зміна часового положення точки перетину нульового рівня цим сигналом. Значення товщини стінок феромагнітної труби визначали за часом перетину нульового рівня інформаційним сигналом, а внутрішній діаметр труби визначали за амплітудним значенням сигналу ВСП.

В цій же роботі [45] було проаналізовано вплив на результати вимірювання величини відстані d між збуджуючою та прийомною котушками в залежності від значення діаметра труби R_i . Помічено, що зі збільшенням відстані між котушками перетворювача, значення амплітуди сигналу в зоні, що відповідає передньому фронту збуджуючого сигналу, швидко зменшується (рис. 1.9). В той же час значення амплітуди в зоні, що відповідає задньому фронту збуджуючого сигналу, менш чутливе до зміни відстані між котушками перетворювача.

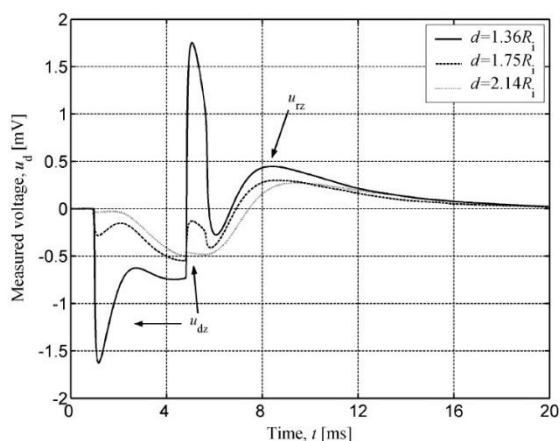


Рис. 1.9. Фрагмент сигналів як функція відстані між котушками ВСП

В роботах [46, 47] представлено експериментальне дослідження імпульсного режиму ВСНК, який застосовували для оцінювань ступеня корозійного ураження металу. В основі обох публікацій лежить оцінка часового положення точки перетину нульового рівня сигналом ВСП. Автори розглядають можливості побудови системи імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю (ІВСНК), методи аналізу сигналів ВСП [46] та способи візуалізації результатів [47].

Значна частина сучасних наукових праць за тематикою ІВСНК присвячена моделюванню процесів з використанням методу кінцевих елементів, комбінації чисельних методів, різного програмного забезпечення (Mathcad, Matlab, Simulink, Labview та інш.) [48 – 52]. Всі вони орієнтовані на виявлення найбільш ефективного методу аналізу сигналу ВСП за відомими методиками з метою отримання прийнятної чутливості до різних параметрів та характеристик ОК. Так, наприклад робота [53] присвячена дослідженням чутливості параметрів інформаційних сигналів ВСП до магнітної проникності та електропровідності матеріалу ОК, що ґрунтуються на використанні методу послідовних наближень числового обернення перетворення Лапласа [54, 55]. Дані роботи в більшості випадків є теоретичними та через їх складність не знайшли практичного застосування.

З метою підвищення чутливості ВСНК щодо виявлення включень, пустот та неоднорідностей в підповерхневому шарі металу на різній глибині

американські вчені тестували імпульсний вихрострумний метод НК. В роботі [56] вони проводять порівняння двох методів ВСНК – традиційного гармонічного та імпульсного. Дослідження були проведені на спеціально виготовленому зразку зі сплаву титану (рис. 1.10 а, б). Зразок складався з двох частин – верхньої пластини та основного блоку матеріалу, що скріплювалися за допомогою клею. В зразку було зроблено отвори висотою 1мм на однаковій глибині залягання, проте різного розміру (рис. 1.10 а). Всього було зроблено 15 плоскодонних отворів, які були розташовані в 5 колонок по три отвори однакового розміру в кожній із них (рис. 1.10 б).

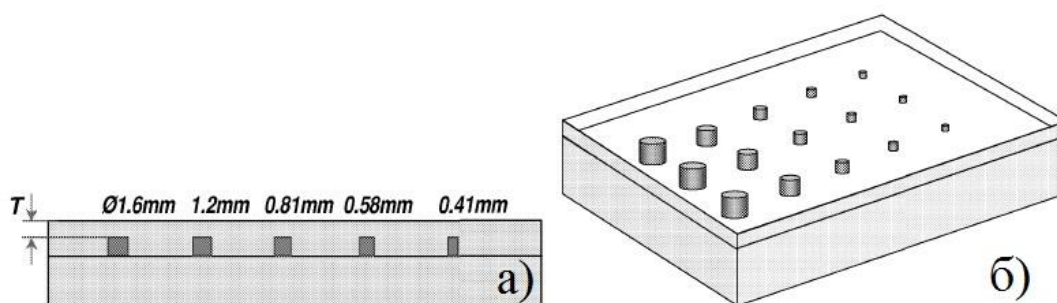


Рис. 1.10. Поперечний переріз (а) та 3D зображення (б) ОК з підповерхневими дефектами [50]

Сканування зразка проводили за допомогою двокоординатного сканеру з кроком 0,5мм. У випадку використання гармонічного збудження було використано стандартний абсолютний датчик, а у випадку імпульсного – датчик зі збуджувальною котушкою діаметром 4мм і меншою вимірювальною, що розташовувалась всередині збуджувальної. Час аналізу для ІВСНК було обрано 40 мкс. Типові сигнали в даному режимі приведені на рис. 1.11, з яких видно зміну пікового значення напруги в залежності від глибини залягання отвору.

За результатами проведених в [56] експериментів побудовано залежність значення пікової напруги ВСП в режимі імпульсного збудження від глибини залягання дефекту, наприклад включення з неелектропровідного матеріалу, в металевому ОК (рис. 1.12).

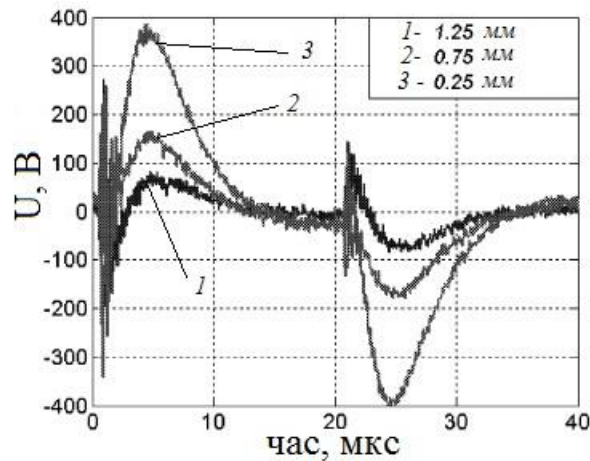


Рис. 1.11. Вид інформаційного сигналу при ІВСНК за даними роботи [50]

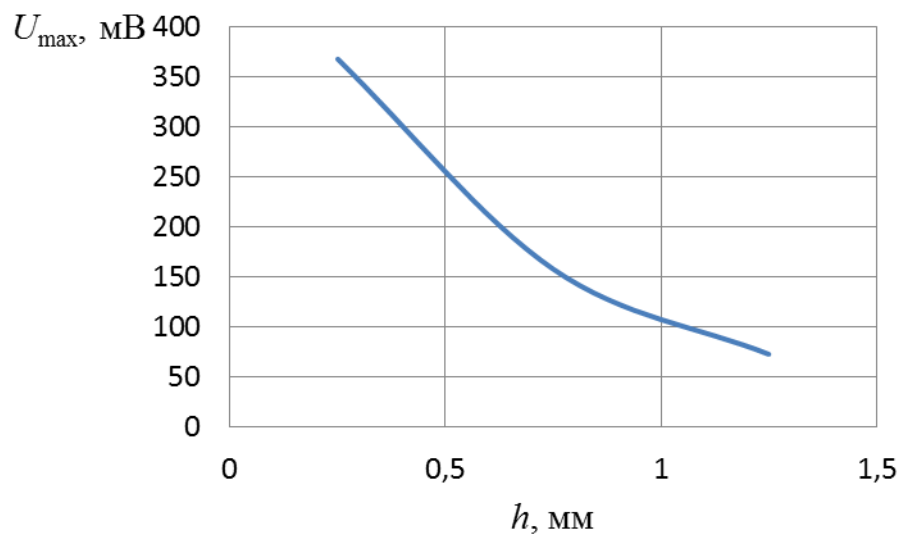


Рис. 1.12. Залежність U_{max} від глибини залягання дефекту

Отримані експериментальні результати сканування зразка з глибиною залягання дефектів 0.25мм за допомогою різних методів збудження вихрових струмів показані на рис. 1.13а, б. За результатами можна зробити висновок, що використання пікового значення амплітуди за умови імпульсного збудження перетворювача не є достатнім для підвищення роздільної здатності в порівнянні з гармонічним збудженням. Також за рахунок використання такого інформативного параметру як амплітуда не можна підвищити чутливість ВСНК. Автори наголошують, що ІВСНК потребує подальших досліджень та удосконалень в конструкціях перетворювачів та методах аналізу їх сигналів.

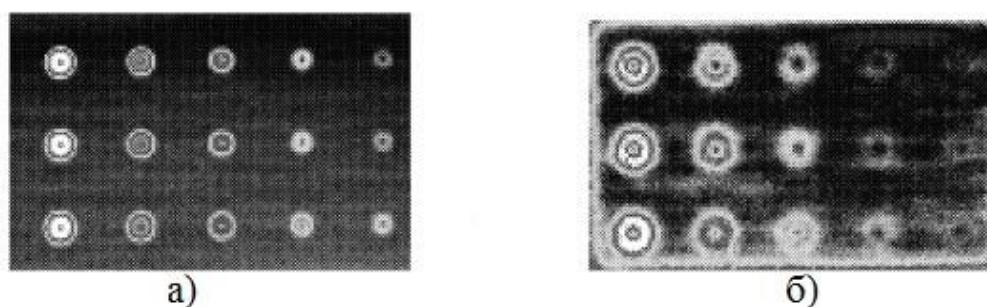


Рис. 1.13. С-скани у випадку сканування ОК з гармонічним (а) та імпульсним (б) збудженням датчиків за даними [50]

Як відомо, роботу ВСП можна представити і математично описати за допомогою еквівалентних схем. Так в роботі [57] проведено дослідження впливу параметрів еквівалентної схеми системи ВСП-ОК на форму інформаційного сигналу та його параметри в умовах збудження ВСП імпульсним сигналом. Автори спробували обґрунтувати критерії вибору параметрів та характеристик збуджувальної та вимірювальної котушки ВСП для отримання максимальної глибини проникнення вихрових струмів в ОК та оптимального відношення сигнал/шум. Комбінуючи різні параметри котушок ВСП було отримано залежності впливу параметрів котушок ВСП на пікове значення напруги інформативного сигналу в залежності від глибини залягання дефекту (полості) в ОК для різних ВСП (рис. 1.14). Параметри ВСП, що використовувались в експерименті, приведено в табл. 1.1, де W – кількість витків, d – зовнішній діаметр, d_f – діаметр феритового стержня, V_0 – напруга збудження, R – активний опір, L – реактивний опір.

На рис. 1.15 приведено залежність відношення сигнал/шум від глибини розташування тріщини в ОК для різних параметрів ВСП.

Приведені на рис. 1.14 та 1.15 результати отримані без використання методів аналізу сигналів з метою оцінювання впливу активного та реактивного опорів котушок ВСП, що можуть бути використані в еквівалентній схемі. Отримані результати свідчать, що для збільшення глибини контролю в імпульсному режимі необхідно враховувати

конфігурацію ВСП. За умови застосування сучасних методів обробки та аналізу сигналів можна покращити чутливість методу ІВСНК.

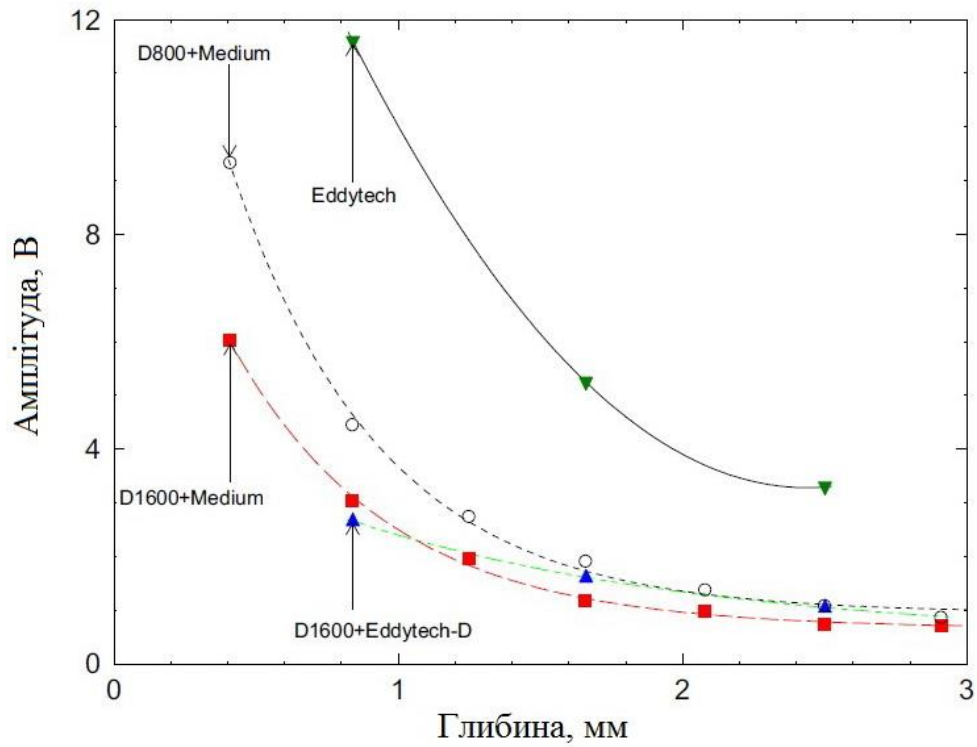


Рис. 1.14. Амплітуда сигналу ВСП для чотирьох конфігурацій ВСП

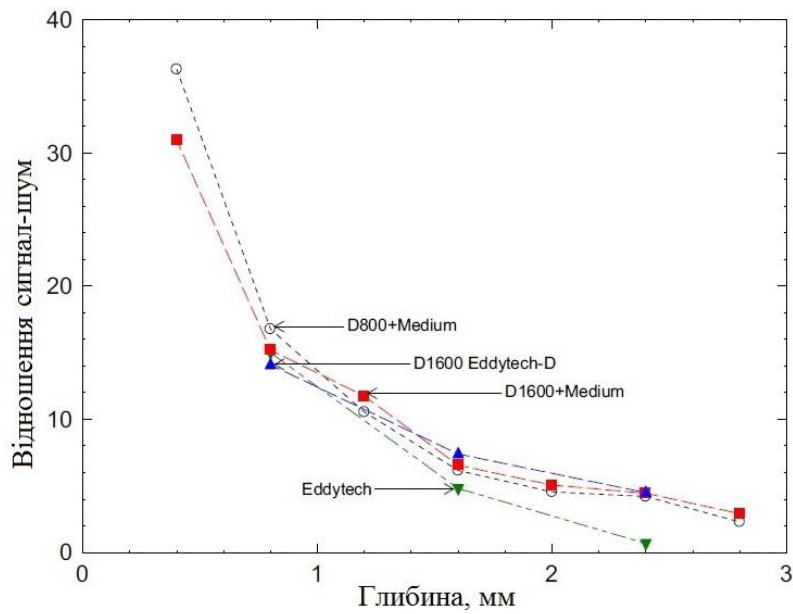


Рис. 1.15. Відношення сигнал/шум для чотирьох конфігурацій ВСП

Таблиця 1.1. Конфігурації та параметри ВСП

Параметри збуджувальної котушки ВСП		Параметри вимірювальної котушки ВСП		
		Eddytech	Medium	Eddytech-D
Eddytech	$W = 400$, $d = 13.8$ мм, $d_f = 1.5$ мм, $V_0 = 10$ В, $R = 58.6$ Ом, $L = 2.16$ мГн	$W = 625$, $d = 6.35$ мм, $d_f = 1.5$ мм, $R = 89.7$ Ом, $L = 2.16$ мГн	X	X
D800	$W = 809$, $d = 22.8$ мм, $d_f = 4.0$ мм, $V_0 = 15$ В, $R = 56.2$ Ом, $L = 17.17$ мГн	X	$W = 300$, $d = 8.2$ мм, $d_f = 4.0$ мм, $R = 63.2$ Ом, $L = 1.55$ мГн	X
D1600	$W = 1635$, $d = 23.9$ мм, $d_f = 4.0$ мм, $V_0 = 15$ В, $R = 121.6$ Ом, $L = 42.0$ мГн	X		$W = 400$, $d = 6138$ мм, $d_f = 1.5$ мм, $R = 58.6$ Ом, $L = 2.16$ мГн

Цікавою є робота [58] інтернаціонального колективу вчених з США, Китаю та Італії, в якій описано застосування ІВСНК для виявлення дефектів в скріплювальних отворах для літакобудування. Як відомо, головною пролемою таких об'єктів є складність виявлення дефектів в отворах для з'єднання декількох шарів металу. На рис. 1.16 схематично представлено ОК з двох алюмінієвих шарів з товщинами верхнього шару 4 мм, нижнього 2 мм, діаметр скріплювального отвору 6 мм, радіальний розмір дефекта 0,2 мм. Вчені зосередилися на 3 ділянках: 1 – ідеальна ділянка, 2 – ділянка отвору, 3 – ділянка отвору з дефектом. Сигнал отримували з GMR-перетворювача (супер-магніторезистивний ефект - Giant Magneto-resistance) з наступним їх аналізом в часовій та частотній області з побудовою А-сканів та С-сканів.

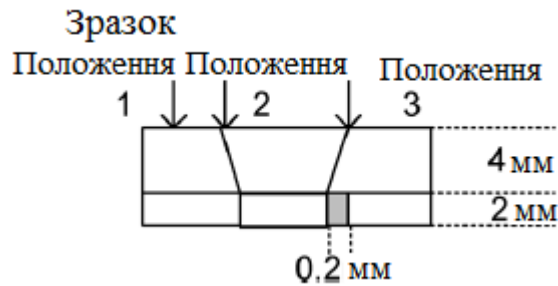


Рис. 1.16. Схематичне зображення двошарового ОК з отвором для заклепок

У випадку аналізу сигналу перетворювача в часовій області як інформативний параметр було обрано пікове значення амплітуди сигналу. На рис. 1.17 показано вигляд інформаційних сигналів перетворювача для обраних ділянок ОК. За піковими значеннями сигналів перетворювача і за умови повного сканування ОК можна побудувати С-скан, зображення якому матиме мінімальні та максимані значення, симетрія яких відносно один одного може бути використана для виявлення дефектів. Різницю пікових значень сигналу для кожної з ділянок можна використати для виявлення підповерхневих дефектів в таких ОК.

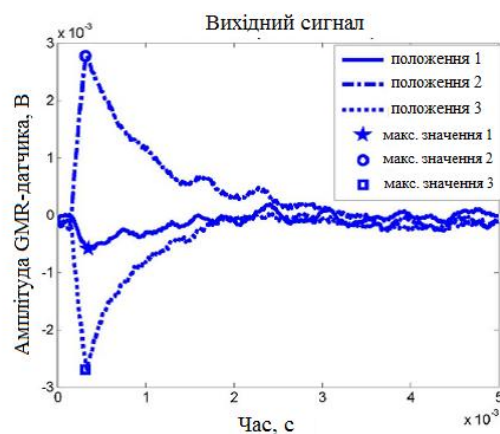


Рис. 1.17. Інформаційний сигнал перетворювача для ділянок ОК 1, 2 та 3 за даними [58]

Аналіз сигналів перетворювача в частотній області базувався на перетворенні Фур'є та повністю підтвердив результати С-скана, отриманого

за аналізом сигналу в часовій області. В [58] всі висновки про параметри ОК ґрунтуються на пікових значеннях – як для часового аналізу сигналу (максимальна амплітуда), так і для частотного (максимальна енергія спектру).

Також в якості інформативних параметрів авторами роботи [59] було використано споживану потужність ВСП в імпульсному режимі збудження та кут суву фаз між напругою і струмом у початковий момент часу. Такі інформативні параметри дозволяють проводити оцінювання електропровідності та магнітної проникності матеріалу, проте є труднощі з вибором інтервалу аналізу сигналу ВСП через неоднозначність характеру залежності інформативного параметру від характеристики ОК.

Можливості цих методів обмежені тим, що значна частина інформації, що міститься в аналізованому сигналі, не використовується. Натомість застосування методу аналізу сигналів ВСНК на основі перетворення Гільберта дозволяє отримувати амплітудну та фазову характеристики сигналів (АХС і ФХС) ВСП, за якими можна оцінити інші інформативні параметри, що вимагає проведення додаткових досліджень [60].

Імпульсний режим у ВСНК також застосовують для контролю багатошарових матеріалів та об'єктів [61]. За рахунок збудження ВСП періодичними імпульсними струмами інформаційний сигнал містить ряд частотних компонент, використання яких дозволяє підвищити інформативність та швидкість контролю, забезпечує виявлення дефектів в багатошарових провідних середовищах на більшій глибині.

З огляду на динаміку публікацій з тематики імпульсного ВСНК можна констатувати, що останнім часом вчені та розробники все частіше звертаються до цього методу НК та проводять спроби модернізації та осучаснення як конструкцій вихрострумів перетворювачів, так і структурних елементів схем приладів, що реалізують даний метод контролю [62].

Таким чином, ВСНК з імпульсним збудженням може істотно доповнити відомі методи за рахунок можливості аналізу інших параметрів сигналів. В розділі 2 показано, що такими параметрами сигналів можуть бути частота, дисперсія фази, коефіцієнт загасання сигналу ВСП у вигляді загасаючих гармонічних коливань.

1.3. Апаратне та нормативне забезпечення імпульсного вихрострумowego контролю

Для сучасних потреб дефектоскопії прийнято розробляти та використовувати універсальні системи ВСНК з можливістю використання різних типів перетворювачів в широкому діапазоні частот [63, 64]. До основних вимог, що висуваються до сучасних засобів ВСНК, відносять:

- роботу в широкому діапазоні частот;
- автоматичну компенсацію впливу зазору між ВСП та ОК;
- можливість проведення контролю в статичному та динамічному режимах;
- відображення сигналу ВСП на екрані приладу у вигляді годографу з його представленням активною та реактивною складовими;
- виведення окремих складових сигналу ВСП у режимі часової розгортки;
- можливість масштабування (підсилення) виведених результатів контролю;
- представлення результату у вигляді С-скану (у випадку сканування локального діапазону).

Перші варіанти практичної реалізації приладів та систем з імпульсним збудженням описані в роботі [65]. Більшість з приладів тих часів вирізнялися простотою конструкції та базувалися на пропусканні прямокутних імпульсів струму через обмотку збудження ВСП, отриманні напруги з вимірювальної обмотки перетворювача і подачі її на інтегратор. В такому разі напруга з інтегратора характеризувалась лінійною залежністю від значень векторного

потенціалу або магнітного потоку вимірювальної обмотки ВСП, а максимальне значення амплітуди отриманого сигналу ВСП залежить від зазору між перетворювачем та ОК. Використання лінійної залежності середніх значень імпульсів напруги від електропровідності дозволило розробляти прилади ІВСНК з лінійною шкалою на відміну від приладів традиційного ВСНК. Прилади подібної конструкції дають не повну інформацію про параметри та характеристики ОК та мають значну похибку [66].

Найбільш відомим та застосовуваним на сьогодні є дефектоскопи серії Pulsec, розроблені фірмою General Electric Sensing & Inspection Technologies, США, для виявлення підповерхневої корозії і тріщин в металах, вимірювання електропровідності. За інформацією виробника [67] основною відмінністю даних імпульсних дефектоскопів від стандартних є котушка збудження, що збуджується широкосмуговим імпульсом, насиченим низькими частотами, та викликає в ОК змінні вихрові струми. Результат представляється на екрані у вигляді пошарового С-скану.

В дефектоскопах Pulsec реалізована технологія імпульсного ВСНК, що базується на використанні GMR-датчиків [68]. В основі GMR-датчиків лежить феномен значного зниження опору матеріалів в результаті впливу магнітного поля (супер-магніторезистивний ефект - Giant Magneto-resistance). Подібні датчики мають високу чутливість, стійкість частот, і малий розмір, проте мають обмежений динамічний діапазон і вузькі лінійні характеристики. Крім того, вихідний сигнал таких датчиків не залежить від напрямку поля (тобто мають низьку чутливість до магнітних полів, що перпендикулярні до напрямку їх чутливості), і їх характеристики не залежать від величини магнітного поля [69].

Першим серійним імпульсним вихрострумовим дефектоскопом є прилад Eddyfi Lyft компанії Eddyfi, Канада, орієнтований на пошук корозії без зняття ізоляційного покриття. Даний дефектоскоп дозволяє виявляти та вимірювати корозію трубопроводу без демонтажу ізоляційного покриття шляхом

оцінювання товщини стінки ОК [70]. Сканування ОК дефектоскопом Lyft можливе динамічним методом та методом співставлення ділянок. Результат сканування ОК представляється у вигляді С-скану в режимі реального часу. Особливістю цього приладу є можливість проведення контролю у випадку наявності на ОК ізоляції з товщиною до 152 мм, при цьому захисний кожух ізоляції з алюмінію, нержавіючої або оцинкованої сталі не є заважаючим фактором [71]. Інформативним параметром сигналу ВСП дефектоскопа Lyft служить загасання магнітного поля в ОК, тобто використовується залежність впливу корозії на товщину стінки ОК. Даний дефектоскоп дозволяє визначити товщину ОК за якою можна провести оцінювання стану корозії, проте мінімально можливе виявлення зони корозійного ураження можливе лише при ураженнях 15% від товщини стінки.

Аналогічним до попереднього дефектоскопа є й дефектоскоп типу RTD-Incotest виробництва Applus+, Великобританія [72, 73]. Його відмінністю є можливість проведення контролю з товщиною ізоляції над ОК до 99 мм, отримання результату контролю товщини протягом 2 - 24 секунд в залежності від товщини стіни ОК, максимально можлива товщина стінки ОК близька до 1 см.

Описані вище три дефектоскопи (Pulsec, Lyft, RTD-Incotest) є єдиними представленими на ринку засобами контролю, що реалізують імпульсний вихрострумний метод та всі вони створені впродовж останнього десятиліття, що свідчить про зростання інтересу до цього методу ВСНК та нерозкритий потенціал даного методу. Основні характеристики дефектоскопів з імпульсним збудженням наведені у табл. 1.2.

На сьогодні існує декілька стандартів, що регламентують застосування засобів та методів ІВСНК. Однак діючий стандарт в Україні ГОСТ 18353-79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов», що встановлює класифікацію видів і методів НК, в основу якої покладено фізичний процес з моменту взаємодії фізичного поля або речовини з ОК до

отримання первинної інформації, є застарілим та не включає ІВСНК [74]. Інший стандарт ГОСТ Р 55611-2013 [75], що визначає терміни і визначення ВСНК, містить інформацію згідно якої імпульсний метод ВСНК базується на використанні та вимірюванні таких інформативних параметрів сигналу ВСП, як амплітуда і (або) тривалість сигналу ВСП, обумовленого взаємодією нестационарного електромагнітного поля з об'єктом контролю. Даний документ орієнтований на потреби підприємств, продукцію та устаткування яких можна виконувати різними методами ВСНК з точки зору наявних засобів, точність яких має задовільні, а не найкращі параметри.

Таблиця 1.2. Узагальнені характеристики приладів та систем ВСНК з імпульсним збудженням

№ пп	Тип приладу / системи	Виробник	Характеристика або параметр ОК, що контролюється	Інформатив ний параметр сигнала ВСП	Одночасний контроль 2-х параметрів ОК
1	Pulsec	GE Sensing & Inspection Technologies, США	наявність корозії, тріщини, електропровідність, товщина покриття	амплітуда	+
2	Eddyfi Lyft	Eddyfi, Канада	наявність корозії під ізоляцією, товщина стінки ОК	амплітуда (загасання магн. поля)	-
3	RTD- Incotest	Applus+, Великобританія	наявність корозії під ізоляцією, товщина стінки ОК	амплітуда (загасання магн. поля)	-

Більш широке трактування ІВСНК дає міжнародний стандарт ISO 20669 2017 [76], який повністю присвячено ІВСНК та є більш конкретизованим по відношенню до засобів та методів. Згідно [76] ІВСНК рекомендовано застосовувати для вимірювання товщини феромагнітних матеріалів з наявним та відсутнім покриттям, ізоляційним шаром на листовому матеріалі. Спосіб в основному використовується для контролю зтоншення стінки ОК,

викликаного великою площею корозії без зняття покриттів. Цей стандарт поширюється на контроль феромагнітного матеріалу з вуглецевої і низьколегованої сталі в діапазоні температур 196 – 500 °С (температура оцінюється на поверхні металу) в процесі експлуатації обладнання. Можливий діапазон товщини стінки ОК становить від 3 мм до 65 мм; діапазон товщини покриттів складає від 0 мм до 200 мм. В якості ОК можуть бути трубопроводи діаметром не менше 50 мм. Недоліками таких обмежень у стандарті є висока чутливість таких засобів до геометрії поверхні ОК. Застосування описаної в [76] методики з поверхнею ОК, що не відповідає встановленим та описаним вище вимогам, призведе до непередбачуваної неточності. Цей стандарт не поширюється на контроль дефектів типу тріщин і втрати локальної товщини металу, викликані точковою корозією. Стандарт не встановлює критерії оцінювання.

Загалом існуючі прилади ВСНК, як відомо [1, 2, 19], подають результати у вигляді годографів та графіків, що не дозволяють проводити детальне оцінювання характеристик та параметрів ОК та їх дефектів. Крім того, результати, представлені в такому вигляді, може коректно інтерпретувати лише оператор зі спеціальною освітою та досвідом. Подібні підходи використовуються і в побудові приладів та систем ВСНК – представлення результату у вигляді графіку величин, зміна яких може бути інтерпретована лише оператором з освітою за визначеною методикою, та кількісної оцінки параметру ОК без вказівки про дефект та його параметри. Застосування сучасних методів та алгоритмів аналізу сигналів ВСП дає змогу проводити автоматичне оцінювання параметрів та характеристик ОК з представленням результату в більш наочній формі.

Проведений огляд публікацій та існуючих приладів та систем ІВСНК свідчить про те, що на практиці найчастіше використовуються такі інформативні ознаки сигналів як зміщення моменту перетину сигналом певного рівня, часовий інтервал між певними вузловими точками, пікові

значення амплітуди та перевищення амплітуди певних порогових значень та моменти цих перетинів. У табл. 1.3 приведено узагальнену інформацію про використовувані параметри сигналів ІВСНК, а у табл. 1.4 – запропоновані в роботі нові для ІВСНК параметри, а саме – власна частота коливань та коефіцієнт загасання сигналу ВСП.

Таблиця 1.3. Використовувані параметри та характеристики сигналів імпульсного ВСНК

№ пп	Інформативний параметр сигнала ВСП	Оцінювана характеристика ОК
1	Зміщення в часі однієї або декількох характерних точок сигналу	товщина металевого покриття на металевій основі
2	Інтервал часу від початку імпульсу до моменту досягнення ним певного порогового рівня	електропровідність
		товщина (при постійній електропровідності)
3	Амплітуда сигналу ВСП	товщина стінки феромагнітних труб
4	Час перетину нульового рівня імпульсного сигналу ВСП відносно його початку, максимальні значення напруги	товщина стінки феромагн. труби
		внутрішній діаметр труби
5	Пікове значення напруги сигналу ВСП	дефекти в багатошарових конструкціях
		глибина залягання підповерхневих включень

Таблиця 1.4. Запропоновані параметри та характеристики сигналів імпульсного ВСНК

№ пп	Інформативний параметр сигнала ВСП	Оцінювана характеристика ОК
1	Власна частота коливань сигналу ВСП	глибина тріщини
		діаметр ОК
2	Коефіцієнт загасання сигналу ВСП	товщина діелектричного покриття на електропровідній основі
		електропровідність матеріалу ОК
		магнітна проникність матеріалу ОК

1.4. Аналіз похибок вимірювання існуючих засобів вихрострумового неруйнівного контролю

Сучасні вимірювальні прилади ВСНК забезпечують вимірювання параметрів ОК з основною похибкою порядку 1 – 5% для одно- та двопараметрового контролю. Проте в багатьох випадках в процесі контролю з'являються додаткові заважаючі фактори (параметри), які збільшують похибку вимірювання. Тому ще одним актуальним напрямом розвитку вихрострумових засобів НК є забезпечення достатньої точності при одночасному збільшенні кількості заважаючих параметрів ОК і розширенні діапазону їх зміни. В такому випадку найкращим вирішенням проблеми буде застосування засобів, які реалізують принцип багатоканальності, тобто засобам з можливістю отримання декількох лінійно незалежних вихідних сигналів від заважаючих параметрів ОК і впливу зовнішнього середовища. В роботі [77] описано ряд ітераційних алгоритмів аналізу інформації у вихрострумових дефектоскопах, які забезпечують необхідну точність вимірювання одного параметру в умовах впливу декількох заважаючих параметрів. Алгоритм реалізується наступним чином: від вихрострумового засобу отримують лінійно незалежні сигнали з ВСП, які є функціями вимірювального і заважаючих параметрів. Далі сигнали направляють до обчислювального пристрою, де відбувається обернене перетворення функцій кожного каналу чи кожного тракту вимірювання, і вирішується система нелінійних рівнянь за певним ітераційним алгоритмом.

Головною умовою щодо використання ітераційних алгоритмів є стабільність роботи засобів вимірювання, оскільки в процесі вимірювання нестабільність функції перетворення призведе до появи додаткової похибки.

Тому рекомендується застосовувати стандартні зразки для навчального режиму контролю, які б відповідали за своїми параметрами ОК.

Сумарна похибка вимірювань загалом визначається методичною похибкою обчислень, похибкою атестації стандартних зразків і похибкою, обумовленою нестабільністю роботи системи.

Відомий вчений в галузі ВСНК Учанін В.М. в своїй роботі «Вплив анізотропії електропровідності контрольованого матеріалу на сигнал вихрострумового перетворювача мультидиференційного типу» [78], запропонував використання мультидиференційних ВСП для підвищення достовірності виявлення підповерхневих дефектів в багатошарових конструкціях та зварних з'єднаннях. В такому ВСП знаходиться дві обмотки збудження і дві вимірювальні обмотки, розміщені по кутам ромбу. Обмотки однакового функціонального призначення знаходяться одна навпроти одної. Осі таких обмоток ВСП орієнтують перпендикулярно до поверхні ОК для того, щоби е.р.с. у вимірювальній обмотці наводилась нормальною складовою магнітного поля вихрових струмів. Обмотки збуджуючих котушок з'єднані таким чином, що наведені ними безпосередньо сигнали за рахунок трансформаторного ефекту, а також сигнали, індуковані нормальною складовою вектора напруженості магнітного поля вихрових струмів, у вимірювальній обмотці взаємно компенсуються. Таким чином, на виході обмоток вимірювальних котушок має місце нульова напруга у випадку розміщення ВСП у повітрі, а також при встановленні на поверхню однорідної ділянки ОК. Крім того, для усунення впливу перекосу вимірювальні котушки з'єднані між собою диференціально. За високої ідентичності виконання всіх чотирьох котушок та їх симетричного розміщення вихідний сигнал ВСП при встановленні на бездефектній ділянці ОК є близьким до нуля.

Проте, використання мультидиференційних чотириелементних ВСП у дефектоскопії показало, що у багатьох випадках їх балансування при

встановленні на поверхню ОК порушується, і, крім того, має місце залежність рівня сигналу небалансу від кутової орієнтації перетворювача. Це обмежує можливості вихрострумових дефектоскопів з такими ВСП для виявлення малорозмірних дефектів та дефектів з великою глибиною залягання. Дослідження показали, що імовірною причиною цього явища є анізотропія питомої електропровідності матеріалу. Справа в тому, що хоча при теоретичному аналізі задач ВСНК майже завжди вважається, що матеріал ОК є ізотропним, у дійсності переважна більшість конструкційних матеріалів є анізотропними.

Аналіз сучасних методів та засобів ВСНК з імпульсним збудженням показали, що метод має ряд переваг, зокрема проведення аналізу сигналу ВСП в часовій області з оцінкою відповідних інформативних параметрів, можливість зміни потужності сигналу для покращення рівня сигнал/шум та збільшення глибини проникнення. Проте як інформативні параметри найчастіше використовуються характерні точки сигналів ВСП, які є нестійкими до впливу шумів, що не дозволяє реалізувати потенційні можливості цього режиму збудження. Обґрунтовано необхідність розвитку теоретичного базису, пошуку нових інформативних параметрів ВСП і удосконалення багатопараметрових методів контролю шляхом комплексного використання неперервного та імпульсного режимів роботи.

Встановлено, що в якості інформативних параметрів сигналів ВСП в імпульсному режимі найчастіше використовуються характерні точки, які не є стійкими до завад та впливу шумів, що спонукає проведення пошуку інших інформативних параметрів та обумовлює актуальність досліджень в напрямі практичного використання нових параметрів, пошуку функціональних залежностей цих параметрів від параметрів та характеристик ОК.

Зроблено висновок про перспективність розвитку ВСНК в імпульсному режимі збудження, що дозволить розширити функціональні можливості ВСНК за рахунок використання нових інформативних параметрів сигналів.

1.5. Мета та завдання дисертаційної роботи

Проведений аналіз сучасної літератури з питань ВСНК свідчить, що існуючі методи обробки та аналізу сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження здебільшого базуються на використанні таких інформативних параметрів, як вузлові точки – їх зміщення, часовий інтервал між ними, часові моменти перетину сигналом певного рівня, пікові значення амплітуди та перевищення амплітуди певних порогових значень та моменти цих перетинів. Проте використання окремих характерних точок сигналу ВСП призводить до низької точності методу ІВСНК через незахищеність вищезгаданих точкових характеристик від впливу завад та шумів. Такий підхід до аналізу сигналу ВСП дає змогу провести лише попередню оцінку параметрів ОК та свідчить про не повне використання інформаційних можливостей сигналу ВСП. Крім того, з аналізу літературних джерел видно, що імпульсний режим збудження ВСП дозволяє доповнити традиційний ВСНК з гармонічним збудженням, проте сьогодні, незважаючи на швидкий розвиток методів та засобів аналізу сигналів, ІРЗ є недостатньо дослідженим.

Основним завданням даної роботи є розроблення методу та створення нового засобу імпульсного ВСНК, пошук та обґрунтування нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів ВСП та дослідження їх зв'язків з параметрами ОК. Для розв'язання поставленої задачі буде розроблено методику аналізу сигналів ВСНК на основі дискретного перетворення Гільберта сигналів з виділенням та аналізом нових для ІВСНК інформативних параметрів; та розроблено інформаційно-діагностичну систему імпульсного ВСНК, яка включає програмно-алгоритмічне

забезпечення для аналізу сигналів ВСП та оцінювання їх інформативних параметрів згідно запропонованої методики.

Результати, отримані в дисертаційній роботі відповідають паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин у наступних пунктах:

- технічні засоби для систем контролю та захисту технічного стану об'єктів;
- дослідження методів визначення загального, локального та пошарового складу твердих тіл, малих домішок із застосуванням методів збудження електронами, іонами, іонізуючим випромінюванням, фотонами, лазерним та електромагнітним випромінюванням.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА СИГНАЛІВ СИСТЕМИ «ВИХРОСТРУМОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ – ОБ’ЄКТ КОНТРОЛЮ» ЗА УМОВИ ІМПУЛЬСНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

В практиці ВСНК користуються ВСП двох типів – параметричними та трансформаторними. Інформативними параметрами сигналу параметричного ВСП є активний опір електричної котушки та її індуктивність. Певним недоліком таких ВСП є підвищена чутливість параметрів інформаційного сигналу до температури навколишнього середовища. В трансформаторних ВСП ця вада суттєво зменшена за рахунок використання кількох вимірювальних котушок (двох, або більше) та їх диференціального включення (т.з. диференціальних та мультидиференціальних ВСП [8]), що одночасно дозволяє збільшити чутливість ВСП до дефектів ОК.

В даному розділі приведені результати теоретичних досліджень процесів в параметричному та трансформаторному ВСП в умовах імпульсного збудження, обґрунтовано інформативні параметри сигналів ВСП у такому режимі роботи, проведено загальний аналіз впливу параметрів та характеристик ОК на інформативні параметри сигналу ВСП. Розглянуто спосіб визначення та аналізу дискретних амплітудних та фазових характеристик інформативного сигналу ВСП, який ґрунтується на застосуванні дискретного перетворення Гільберта (ДПГ). Результати, отримані в даному розділі, опубліковані в наступних наукових працях [79 – 83].

2.1. Аналіз роботи параметричного вихрострумowego перетворювача з імпульсним збудженням в режимі холостого ходу

З метою аналізу процесів формування інформаційних сигналів в системі ВСП-ОК користуються її представленням системою індуктивно зв’язаних

електричних контурів [84, 85]. Спочатку розглянемо еквівалентну схему параметричного ВСП в режимі холостого ходу. Така схема для випадку збудження ВСП імпульсним сигналом приведена на рис. 2.1, де $u_{\Gamma}(t)$ – імпульсна напруга джерела живлення, R – резистор, C_I – сумарна ємність, утворена міжвитковою ємністю котушки та іншими паразитними ємностями перетворювача, R_I – активний опір котушки індуктивності, L_I – індуктивність електричної котушки. i_1 , i_2 , i_3 – струм у відповідних гілках схеми. Принципіально новим в еквівалентній схемі рис. 2.1 є включення до її складу ємності, яка несуттєва для аналізу неперервного режиму роботи ВСП (у випадку збудження ВСП гармонічним сигналом, тобто у стаціонарному або квазістаціонарному режимі роботи), але яка відчутно впливає на формування сигналу ВСП в імпульсному режимі роботи.

Напруга джерела живлення $u_{\Gamma}(t)$, яка являє собою періодичну послідовність імпульсів прямокутної форми, представляється виразом:

$$u_{\Gamma}(t) = \begin{cases} u_0, & t \in n \cdot T_n + \tau, n = 0, 1, 2... \\ 0, & t \notin n \cdot T_n + \tau, \end{cases} \quad (2.1)$$

де u_0 , T_n , τ – відповідно амплітуда, період та тривалість імпульсів.

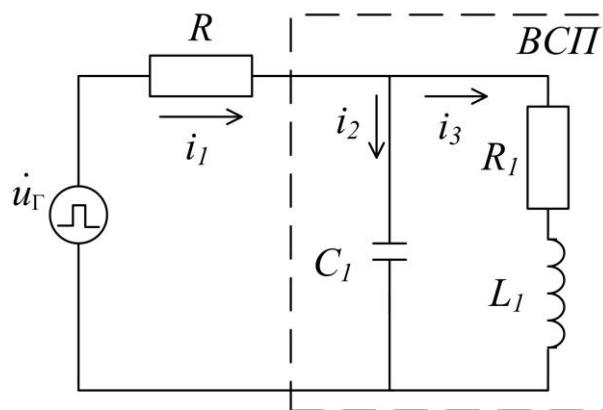


Рис.2.1. Еквівалентна схема параметричного ВСП з підключенням до генератора імпульсних сигналів

За умови імпульсного збудження параметричного ВСП для виявлення та оцінювання його реакції на fronti збуджуючого імпульсного сигналу доцільним є аналіз перехідних процесів в електричному колі ВСП. Як відомо [84, 86], такий аналіз базується на розв'язанні характеристичного рівняння, яке відповідає виразу вхідного комплексного опору контуру електричного ланцюга за змінного струму.

Вхідний комплексний опір для еквівалентної схеми параметричного ВСП (рис. 2.1) має вигляд:

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega) = R + \frac{R_1 + i\omega L_1}{1 + R_1 i\omega C_1 + (i\omega)^2 L_1 C_1}. \quad (2.2)$$

Відповідне (2.2) характеристичне рівняння записується як:

$$R + \frac{R_1 + pZ_L}{1 + pR_1C_1 + p^2L_1C_1} = 0, \quad (2.3)$$

або

$$RZ_1C_1 \cdot p^2 + (RR_1C_1 + L_1) \cdot p + R + R_1 = 0, \quad (2.4)$$

де p – параметр характеристичного рівняння, $p = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$.

Розв'язком квадратного рівняння (2.4) є корені виду:

$$p_{1,2} = -\frac{RR_1C_1 + L_1}{2RL_1C_1} \pm \sqrt{\frac{(RR_1C_1 + L_1)^2}{4R^2L_1^2C_1^2} - \frac{R + R_1}{RL_1C_1}}. \quad (2.5)$$

З теорії електротехнічних кіл відомо [86, 87], що в розрахунках перехідних процесів повний струм контуру приймається рівним сумі вимушеного та вільного струмів. Вимушений струм задається джерелом живлення електричної схеми. Ця складова не містить інформації про властивості ОК, тому не уявляє інтересу для аналізу сигналів ВСП.

Вільний струм у будь-якому ланцюгу має загасаючий характер в часі та описується компонентами виду $Ae^{\alpha t}$, де α – коефіцієнт загасання, який залежить від параметрів схеми, та може бути визначений через корені характеристичного рівняння.

Залежно від співвідношення складових $\frac{(RR_1C_1 + L_1)^2}{4R^2L_1^2C_1^2}$ та $\frac{R + R_1}{RL_1C_1}$ в рівнянні (2.5), можливі три типи коренів характеристичного рівняння p_1 та p_2 і відповідно три варіанти виразів для представлення компонент вільної складової струму.

Позначимо критичний опір контура як:

$$R_{\text{кр}} = \frac{R_1C_1L_1 \pm 2L_1\sqrt{L_1C_1}}{R_1^2C_1^2 - 4L_1C_1}. \quad (2.6)$$

Можливі три варіанти вибору опору резистора R у схемі на рис. 2.1:

1) $R > R_{\text{кр}}$, корені p_1 та p_2 є дійсними, $p_1 \neq p_2$, від'ємними, відповідають загасаючому струму виду:

$$i_{\text{с}}(t) = A_1e^{p_1t} + A_2e^{p_2t}, \quad p_1, p_2 < 0, \quad t \in T_a, \quad A_1, A_2 > 0, \quad (2.7)$$

де T_a – час аналізу $T_a < T_n$, A_1 та A_2 – постійні інтегрування;

2) $R = R_{\text{кр}}$, корені є дійсними, $p_1 = p_2$, від'ємними, що відповідає загасаючому струму виду:

$$i_{\text{с}}(t) = (A_1 + A_2t)e^{p_1t}, \quad p_1 = p_2 < 0, \quad t \in T_a, \quad A_1, A_2 > 0; \quad (2.8)$$

3) $R < R_{\text{кр}}$, корені є комплексно спряженими з від'ємною дійсною частиною виду $p_{1,2} = -\alpha \pm i\omega_0$, де $\alpha > 0$ – коефіцієнт загасання (декремент), ω_0 – кутова частота власних коливань, що відповідає струму у вигляді загасаючого гармонічного коливання:

$$i_g(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + v), \quad p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0, \quad t \in T_a \gg \frac{1}{\alpha}, \quad A > 0, \quad (2.9)$$

де A – постійна інтегрування, v – початкова фаза.

Для аналізу ВСП в умовах імпульсного збудження (рис. 2.1), з точки зору підвищення інформативності, найбільш цікавим є третій випадок, коли корені характеристичного рівняння є комплексно спряженими, а отже вільна складова струму представляється загасаючим синусоїдальним коливанням з кутовою частотою ω_0 та коефіцієнтом загасання α :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R + R_1}{RL_1C_1} - \frac{(RR_1C_1 + L_1)^2}{4R^2L_1^2C_1^2}}, \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{RR_1C_1 + L_1}{2RL_1C_1}. \quad (2.11)$$

Падіння напруги на ВСП в такому випадку визначається формулою:

$$u(t) = u_0 \cdot f(t - \tau_0) + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + v), \quad t \in T_a \gg \frac{1}{\alpha}, \quad \tau_0 \in T_a, \quad A > 0, \quad (2.12)$$

де $f(t - \tau_0)$ – функція одиничного імпульса.

В момент коли $t = 0$ с, формула (2.12) матиме вигляд:

$$u(t=0) = u_{C_1}(t=0) - u_0 \cdot f(t - \tau_0) = A \sin(v), \quad (2.13)$$

де $u_{C_1}(t=0)$ – значення напруги на ємності C_1 в момент часу $t = 0$ с. Таким чином отримаємо:

$$A = \frac{u_{C_1}(0) - u_0 \cdot f(t - \tau_0)}{\sin(v)}, \quad (2.14)$$

$$\left. \frac{du(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\alpha A \sin(v) + A \omega_0 \cos(v) = 0, \quad (2.15)$$

$$\frac{\sin(\nu)}{\cos(\nu)} = \operatorname{tg}(\nu) = \frac{\omega_0}{\alpha}. \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.14) та (2.16), формула (2.12) матиме вигляд:

$$u(t) = u_0 \cdot f(t - \tau_0) + (u_{c_1}(0) - u_0 \cdot f(t - \tau_0)) e^{-\alpha t} \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\omega_0} \sin\left(\omega_0 t + \operatorname{arctg}\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)\right), \quad (2.17)$$

Відомо [2, 8], що внесення ОК в поле котушки ВСП приводить до зміни її електричних параметрів – активного опору і індуктивності.

Таким чином, в якості інформативних параметрів контролю потенційно можливо використання трьох параметрів: коефіцієнта загасання α , частоти власних коливань ω_0 та початкової фази ν (за додаткової умови задання опорного сигналу частоти ω_0), що власне і визначає підвищену інформативність такого режиму імпульсного ВСНК.

Аналіз роботи ВСП з імпульсним збудженням в режимі холостого ходу дозволив виявити умови виникнення загасаючого гармонічного сигналу ВСП та обґрунтувати можливість використання в імпульсному вихрострумовому контролі нових інформативних параметрів – коефіцієнта загасання, частоти власних коливань та початкової фази сигналу.

2.2. Аналіз процесів в системі «параметричний вихрострумовий перетворювач – немагнітний об'єкт контролю»

Виходячи з загальних правил та методик розрахунку лінійних електричних кіл, систему «параметричний ВСП – немагнітний ОК» можна представити еквівалентною схемою, зображеною на рис. 2.2. Немагнітний ОК врахований еквівалентною схемою, яка являє собою послідовно з'єднані елементи $R_2(\bar{w})$ та $L_2(\bar{w})$, які залежать від вектору параметрів та

характеристик ОК \bar{w} , з введеним індуктивним зв'язком між котушками L_1 та $L_2(\bar{w})$.

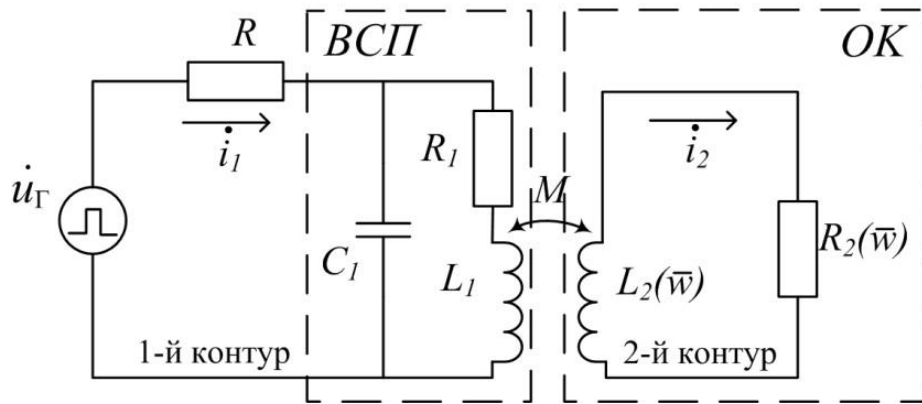


Рис.2.2. Еквівалентна схема системи ВСП – ОК з підключенням до генератора імпульсних сигналів

Виконавши розв'язку індуктивних контурів [88], схема на рис. 2.2 представляється у вигляді рис. 2.3, а потім зводиться до схеми на рис. 2.4 з параметрами:

$$\dot{Z}_1(\omega) = R_1 + i\omega(L_1 - M), \quad (2.18)$$

$$\dot{Z}_2(\omega, \bar{w}) = \frac{\dot{Z}_3(\omega, \bar{w})i\omega M}{\dot{Z}_3(\omega, \bar{w}) + i\omega M}, \quad (2.19)$$

$$\dot{Z}_3(\omega, \bar{w}) = R_2(\bar{w}) + i\omega(L_2(\bar{w}) - M). \quad (2.20)$$

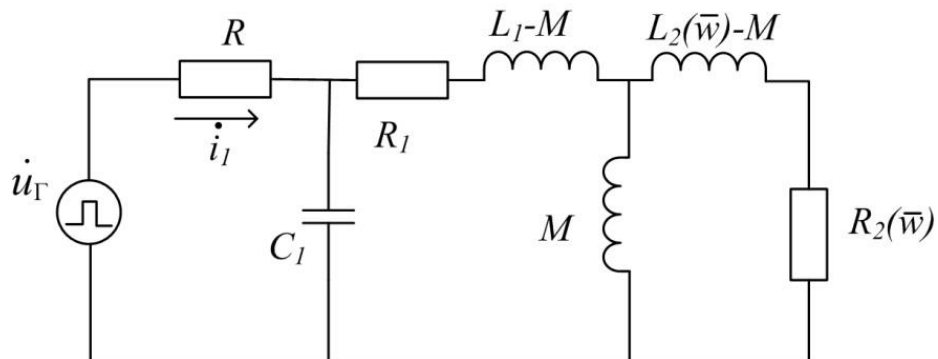


Рис.2.3. Еквівалентна схема системи ВСП – ОК з розв'язкою індуктивних контурів

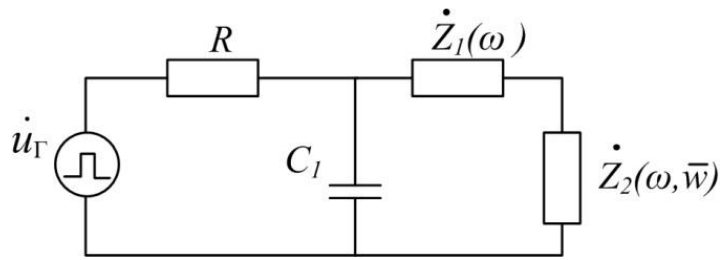


Рис.2.4. Спрощена еквівалентна схема системи ВСП - ОК

Вхідний опір для еквівалентної схеми параметричного ВСП – ОК (рис. 2.4) визначається виразом:

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega, \bar{w}) = R + \frac{\dot{Z}_1(\omega) + \dot{Z}_2(\omega, \bar{w})}{1 + \dot{Z}_1(\omega)i\omega C_l + \dot{Z}_2(\omega, \bar{w})i\omega C_l}. \quad (2.21)$$

Відповідне характеристичне рівняння електричного кола є рівнянням 3-го порядку та записується як:

$$\begin{aligned} & C_1 R (L_1 L_2(\bar{w}) - M^2) p^3 + \\ & + (C_1 R L_1 R_2(\bar{w}) + C_1 R_1 L_2(\bar{w}) R + L_1 L_2(\bar{w}) - M^2) p^2 + \\ & + (L_2(\bar{w}) R + C_1 R_1 R_2(\bar{w}) R + L_2(\bar{w}) R_1 + L_1 R_2(\bar{w})) p + \\ & + R R_2(\bar{w}) + R_1 R_2(\bar{w}) = 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

або у загальному вигляді:

$$A p^3 + B p^2 + C p + D = 0, \quad (2.23)$$

з коефіцієнтами: $A = C_1 R (L_1 L_2(\bar{w}) - M^2)$,

$$B = C_1 R L_1 R_2(\bar{w}) + C_1 R_1 L_2(\bar{w}) R + L_1 L_2(\bar{w}) - M^2,$$

$$C = L_2(\bar{w}) R + C_1 R_1 R_2(\bar{w}) R + L_2(\bar{w}) R_1 + L_1 R_2(\bar{w}),$$

$$D = R R_2(\bar{w}) + R_1 R_2(\bar{w}).$$

В останніх виразах для спрощення запису не вказано функціональну залежність коефіцієнтів A , B , C , D від вектору параметрів ОК \bar{w} .

Для визначення коренів кубічного рівняння (2.23) в області комплексних чисел використовується, як правило, формула Кардано [89]. Для цього рівняння (2.23) представляють в канонічній формі:

$$y^3 + by + q = 0, \quad (2.24)$$

$$\text{де } b = \frac{3AC - B^2}{3A^2},$$

$$q = \frac{2B^3 - 9ABC + 27DA^2}{27A^3}.$$

З урахуванням цих співвідношень корені рівняння (2.23) визначаються формулою $p = y - \frac{B}{3A}$.

Дискримінант кубічного рівняння (2.24) визначається як:

$$\Delta = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 = \frac{(2B^3 - 9ABC + 27DA^2)^2}{2916A^6} + \frac{(3AC - B^2)^3}{729A^6} \quad (2.25)$$

За умови $\Delta > 0$, рівняння (2.24) матиме один дійсний та два комплексно спряжених кореня:

$$y_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}}, \quad (2.26)$$

$$y_{2,3} = -\frac{1}{2} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right) \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}} \right), \quad (2.27)$$

Розв'язками рівняння (2.23) є корені виду:

$$p_1 = y_1 - \frac{B}{3A}, \quad p_2 = y_2 - \frac{B}{3A}, \quad p_3 = y_3 - \frac{B}{3A}.$$

У випадку коренів (2.27), струм на ВСП має вигляд загасаючого гармонічного коливання, а отже корені характеристичного рівняння будуть

мати загальний вигляд $p_{1,2}(\bar{\omega}) = -\alpha(\bar{\omega}) \pm i\omega_0(\bar{\omega})$, тобто подібний до отриманого в п.2.1.

Таким чином, і в цьому випадку можна рекомендувати коефіцієнт загасання і власну частоту сигналу ВСП як інформативні параметри імпульсного ВСНК.

2.3. Аналіз процесів в системі «параметричний вихрострумний перетворювач – магнітний об’єкт контролю» в режимі контролю

Враховуючи роботу [90], де запропоновано представляти еквівалентну схему магнітного ОК еквівалентним RLC контуром, який формально відповідає отриманим сигналам ВСП, еквівалентна схема системи «ВСП – магнітний ОК» представляється елементами $R_2(\bar{\omega})$, $C_2(\bar{\omega})$ та $L_2(\bar{\omega})$, з введеним індуктивним зв’язком між котушками L_1 та $L_2(\bar{\omega})$ (рис. 2.5).

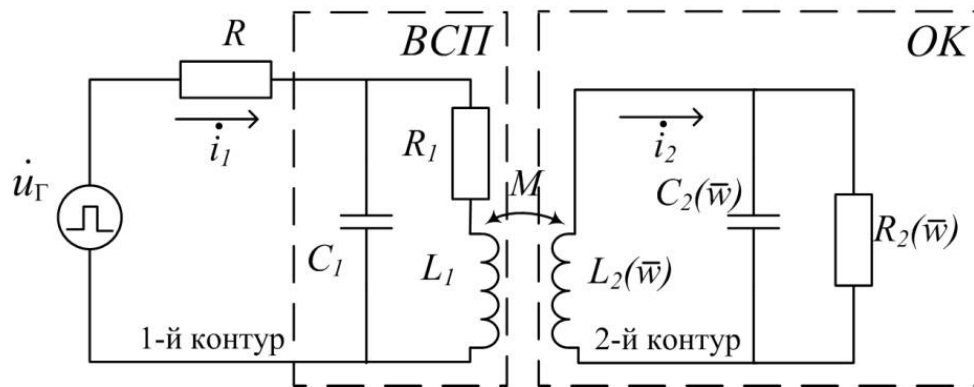


Рис.2.5. Еквівалентна схема системи «ВСП - магнітний ОК» з підключенням до генератора імпульсних сигналів

Еквівалентну схему (рис. 2.5) можна спростити, аналогічно тому, як це зроблено у п.2.2 (методом розв’язання індуктивних контурів) та звести до схеми на рис. 2.6. Елементи такої схеми визначаються за формулами:

$$\dot{Z}_1(\omega) = R_1 + i\omega(L_1 - M), \quad (2.28)$$

$$\dot{Z}_2(\omega, \bar{w}) = \frac{\dot{Z}_3(\omega, \bar{w})i\omega M}{\dot{Z}_3(\omega, \bar{w}) + i\omega M}, \quad (2.29)$$

$$\dot{Z}_3(\omega, \bar{w}) = \frac{R_2(w)}{1 + i\omega C_2(w)R_2(w)} + i\omega(L_2(w) - M). \quad (2.30)$$

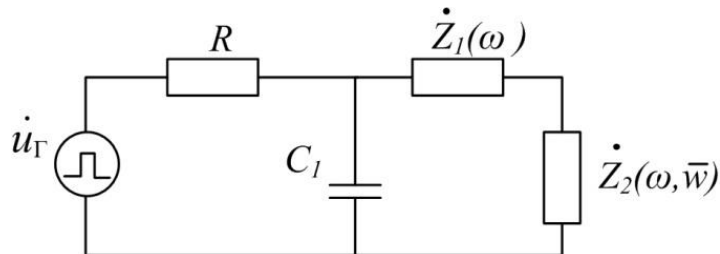


Рис.2.6. Спрощена еквівалентна схема системи «ВСП - магнітний ОК»

Вхідний опір для еквівалентної схеми параметричного ВСП – магнітного ОК (рис. 2.6) матиме вигляд:

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega, \bar{w}) = R + \frac{\dot{Z}_1(\omega) + \dot{Z}_3(\omega, \bar{w})}{1 + \dot{Z}_1(\omega)i\omega C_1 + \dot{Z}_3(\omega, \bar{w})i\omega C_1}. \quad (2.31)$$

За таких умов характеристичне рівняння має 4-й порядок та розв'язується за допомогою відомих математичних перетворень (наприклад, через резольвенту, за формулою Декарта — Ейлера або методом Феррарі [91]). Корені, що є розв'язком рівняння 4-го порядку також можуть бути приведені до виду $p_{1,2}(\bar{w}) = -\alpha(\bar{w}) \pm i\omega_0(\bar{w})$.

2.4. Аналіз роботи трансформаторного вихрострумowego перетворювача в режимі холостого ходу

З метою аналізу процесів в трансформаторному перетворювачі в умовах імпульсного збудження в режимі холостого ходу, розглянемо еквівалентну схему такого ВСП, представлену індуктивно зв'язаними електричними контурами (рис. 2.7). В даній схемі: R – резистор; u_G – напруга збудження

перетворювача; C_I – сумарна ємність, утворена міжвитковою ємністю котушки та іншими паразитними ємностями перетворювача, R_I, L_I – опір та індуктивність збуджувальної котушки ВСП; R_2, L_2 – опір та індуктивність вимірювальної котушки ВСП, i_1, i_2 – струми в контурах.

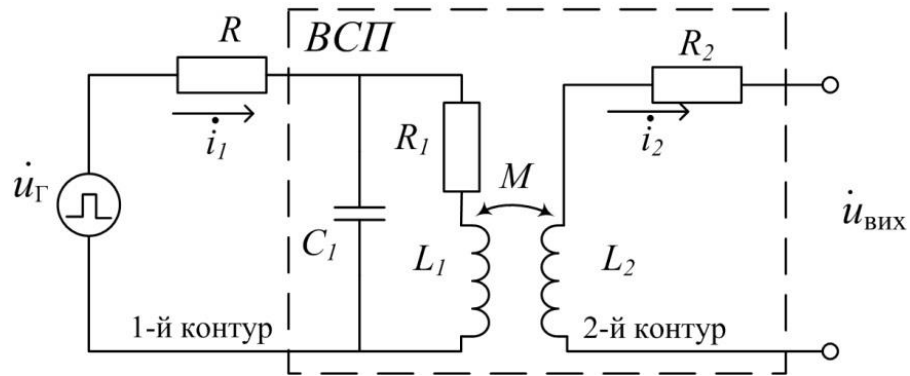


Рис.2.7. Еквівалентна схема трансформаторного ВСП за умови його підключення до генератора імпульсних сигналів

Користуючись розв'язкою індуктивних контурів [88], схему на рис. 2.7 можна привести до зображеної на рис. 2.8 схеми, яка в свою чергу спрощується до еквівалентної схеми на рис. 2.9 з параметрами:

$$\dot{Z}_1(\omega) = R_I + i\omega(L_I + M), \quad (2.32)$$

$$\dot{Z}_2(\omega) = \frac{1}{\omega^2 M} + R_2 + i\omega(L_2 + M). \quad (2.33)$$

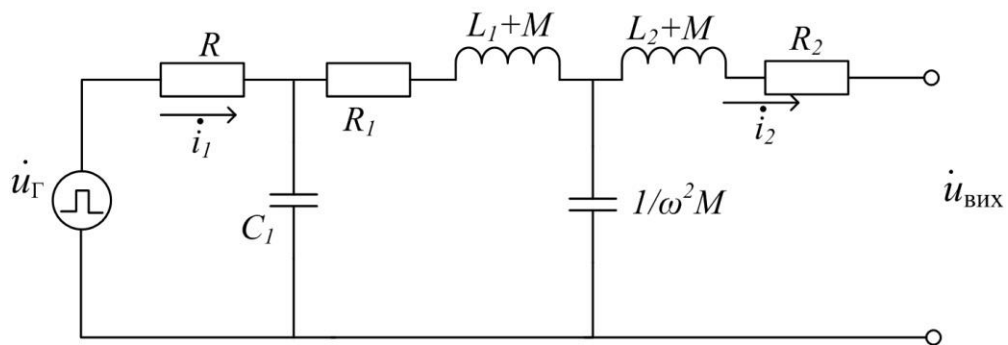


Рис.2.8. Еквівалентна схема трансформаторного ВСП з розв'язкою індуктивних контурів

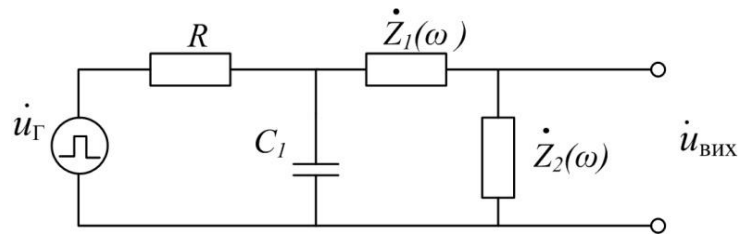


Рис.2.9. Спрощена еквівалентна схема трансформаторного ВСП

Вихідний опір еквівалентної схеми трансформаторного ВСП в режимі холостого ходу (рис. 2.9) задається виразом:

$$\dot{Z}_{\text{екв}}(\omega) = \frac{1}{\omega^2 M} + R_2 + i\omega(L_2 + M). \quad (2.34)$$

В цьому випадку відповідне характеристичне рівняння матиме 3-й порядок:

$$\frac{1}{\omega^2 M} + R_2 + i\omega(L_2 + M) = 0, \quad (2.35)$$

або

$$iM(L_2 + M)\omega^3 + MR_2\omega^2 + 1 = 0. \quad (2.36)$$

З отриманого виразу характеристичного рівняння видно, що процеси в трансформаторному ВСП в умовах імпульсного збудження є подібними до процесів в системі «параметричний ВСП – немагнітний ОК» та за певних умов може характеризуватись вихідним сигналом у вигляді загасаючого гармонічного коливання з певною власною частотою, коефіцієнтом загасання та початковою фазою.

Крім того, з результатів аналізу процесів систем «параметричний ВСП – ОК» в умовах імпульсного збудження видно, що характеристичні рівняння для випадку систем «трансформаторний ВСП – немагнітний ОК» та «трансформаторний ВСП – магнітний ОК» матимуть, відповідно, 4 та 5

порядок. При цьому корені цих рівнянь також можуть бути приведені до виду $p_{1,2}(\bar{w}) = -\alpha(\bar{w}) \pm i\omega_0(\bar{w})$.

Таким чином, аналіз амплітудо-часових та фазово-часових характеристик загасаючих гармонічних коливань, які за певних умов виникають в ланцюгах ВСП в імпульсному режимі збудження, може суттєво розширити інформативні можливості імпульсного методу ВСНК [75, 76].

2.5. Перетворення Гільберта як методологічна основа аналізу інформаційних сигналів імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю

В умовах стрімкого розвитку методів цифрового аналізу неперервних сигналів перетворення Гільберта (ПГ) та його цифровий аналог – дискретне перетворення Гільберта цифрових послідовностей [92, 93] отримали широке застосування в процесах аналізу модульованих сигналів, аналізу двовимірних та тривимірних комплексних сигналів, дослідження циклічних сигналів в медицині, оцінювання миттєвої частоти сигналу, вимірюванні затримки сигналів тощо [94, 95].

В загальному вигляді ПГ дійсного сигналу $u_r(t) \in L_2(-\infty, \infty)$ являє собою процедуру, що використовується для визначення відповідного комплексного аналітичного сигналу виду:

$$\dot{u}_c(t) = u_r(t) + iu_H(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (2.37)$$

де $i = \sqrt{-1}$, $u_H(t) = \mathbf{H}[u_r(t)]$ – ПГ сигналу $u_r(t)$, \mathbf{H} – оператор ПГ.

Уявна частина $u_H(t)$ сигналу $\dot{u}_c(t)$ є гільберт-образом вихідного сигналу $u_r(t)$, всі спектральні компоненти якого зсунуті по фазі на 90° відносно $u_r(t)$ (рис. 2.10).

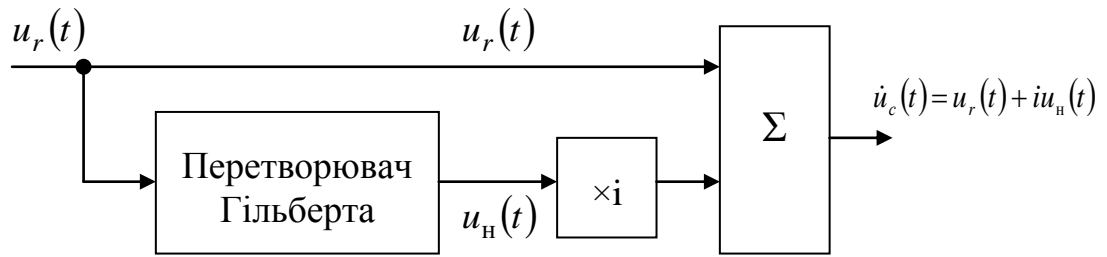


Рис. 2.10. Функціональне співвідношення між $u_c(t)$ та $u_r(t)$

Відомо [96], якщо дійсний сигнал має вид $u_r(t) = \cos(\omega_0 t)$, його гільберт-образ $u_h(t)$ уявляє собою сигнал синусоїдної форми, а аналітичний сигнал $u_c(t)$ може бути записаний як комплексна експонента:

$$\dot{u}_c(t) = u_r(t) + iu_h(t) = \cos(\omega_0 t) + i \sin(\omega_0 t) = e^{i\omega_0 t}. \quad (2.38)$$

За допомогою аналітичного сигналу можна визначити миттєві параметри та характеристики сигналів в часовій області, такі як амплітуда, фаза, частота в певний момент часу або амплітудну, фазову та частотну характеристики.

За умови, що дійсний сигнал $u_r(t)$ промодульовано за амплітудою і в його обвідній міститься корисна інформація, миттєві значення цієї обвідної $A(t)$ можна визначити через аналітичну версію сигналу $u_r(t)$ згідно наступного виразу:

$$A(t) = |\dot{u}_c(t)| = \sqrt{u_r(t)^2 + u_h(t)^2}. \quad (2.39)$$

Обвідна сигналу співпадає з модулем $\dot{u}_c(t)$. На рис. 2.11. приведено приклад демодуляції амплітудно-модульованого сигналу з синусоїдною несучою. Програма для розрахунку обвідної наведена у Додатку Б.

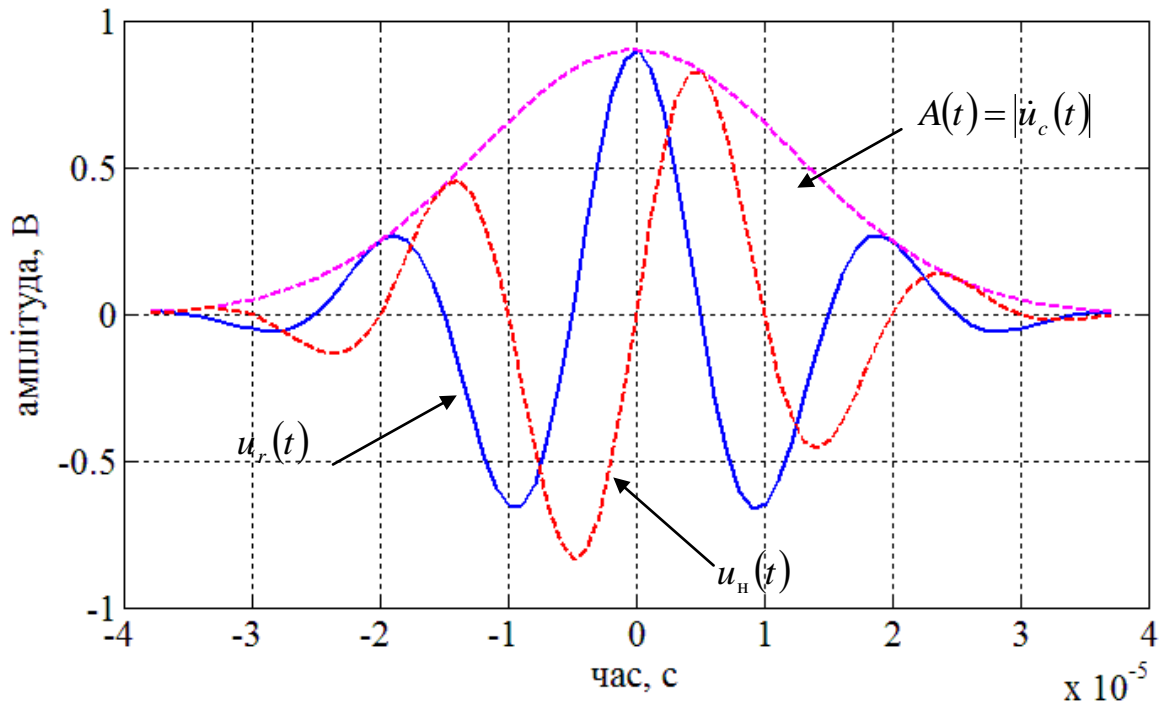


Рис. 2.11. Приклад графіку обвідної $A(t)$ сигналу $u_r(t)$

Припустимо, що дійсний сигнал $u_r(t)$ модульовано по фазі, оцінювання фазової арактеристики сигналу $u_r(t)$ здійснюється за виразом [94, 97]:

$$\Phi(t) = \text{Arctg} \left[\frac{u_n(t)}{u_r(t)} \right], \quad (2.40)$$

де функція Arctg однозначно визначає фазу сигналу на всьому інтервалі його спостереження [93].

У випадку коли дійсний сигнал модульовано по частоті (тобто інформативним параметром є частота сигналу), оцінити його миттєву частоту $F(t)$ можна через оцінку швидкості зміни фази $\phi(t)$ користуючись виразом:

$$F(t) = \frac{d[\Phi(t)]}{dt} = \frac{d \left\{ \arctg \left[\frac{u_n(t)}{u_r(t)} \right] \right\}}{dt} \quad (2.41)$$

ПГ може бути реалізоване за допомогою лінійного фільтра з передатною

характеристикою $\dot{K}(f) = -i \operatorname{sign}(f)$ та імпульсною характеристикою $h(t) = \frac{1}{\pi t}$, $t \in (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$ (рис. 2.12, де f – частота сигналу, $f = \omega/2\pi$). Цей фільтр можна вважати ідеальним фазообертачем, оскільки для нього $|\dot{K}(f)| = 1$, крім значення $|\dot{K}(0)| = 0$, отже, такий фільтр зсуває або «повертає» фази всіх компонент спектру сигналу на кут $+0,5\pi$ у діапазоні від’ємних частот та на $-0,5\pi$ у діапазоні додатних, і залишає незмінним амплітудні співвідношення між всіма частотними компонентами сигналу [98].

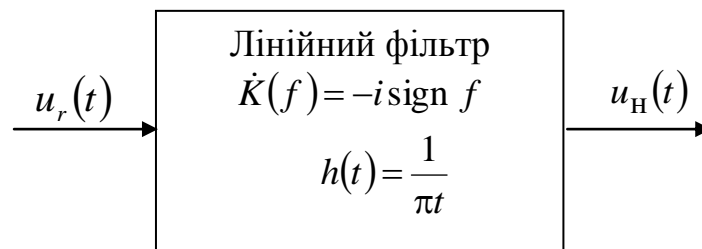


Рис. 2.12. Фільтр, що реалізує пряме перетворення Гільберта

Обернене перетворення Гільберта реалізує лінійний фільтр з передатною характеристикою $\dot{K}_3(f) = \frac{1}{\dot{K}(f)} = -\dot{K}(f) = i \operatorname{sign}(f)$, $f \neq 0$.

З метою удосконалення вихрострумової дефектоскопії та підвищення швидкодії засобів визначення локальних змін параметрів інформаційного сигналу в межах одного чи декількох періодів сигналу, до яких призводить наявність дефектів в зоні сканування ОК ВСП, розглянемо застосування ПГ.

Даний спосіб ґрунтується на збудженні в ОК вихрових струмів, прийманні інформаційного сигналу ВСП, який є реакцією поля вихрових струмів на контрольовану ділянку об’єкту, визначенні внесеного сигналу ВСП як різниці інформаційного та компенсаційного сигналів, аналого-цифровому перетворенні цього сигналу з частотою дискретизації $f_d = 1/T_d$ значно вищою за частоту інформаційного сигналу, його дискретному ПГ і визначенні за прийнятим сигналом та його гільберт-

образом одночасно дискретних амплітудних і фазових характеристик інформаційного сигналу, а також ідентифікація дефектів за цими характеристиками.

Застосування способу цифрової обробки сигналу на основі ДПГ дозволяє відмовитись від використання в структурі засобів ІВСНК синхронних детекторів [61], які мають значну інерційність, збільшити швидкодію і отримати більше інформації у цифровій формі, що створює підґрунтя для застосування статистичних методів аналізу експериментальних даних з метою підвищення точності вимірювання характеристик сигналу та вірогідності вихрострумowego контролю.

Спосіб реалізується на прикладі відомих функціональних блоків та пристроїв (рис. 2.13). Двофазний генератор 1 на одному з виходів формує сигнал $u(t) = U \cos(2\pi ft)$, де U – амплітуда сигналу, f – частота сигналу, який подається на котушку збудження ВСП 2 (в дискретному варіанті поточний час аналітично визначається як $t = kT_d$, $k = 0, 1, 2, \dots$). Амплітудна та фазова характеристики сигналу, що формується на виході вимірювальної котушки перетворювача 2, залежать від фізико-механічних параметрів ОК та можливих дефектів у ньому. Для компенсації напруги холостого ходу $u_0(t) = U_0 \cos(2\pi ft - \varphi_0)$, де φ_0 – початкова фаза, $\varphi_0 \in [0, 2\pi)$, інформаційний сигнал подають на суматор 3, до другого входу якого надходить сигнал компенсації $u_k(t) = -u_0(t)$ з другого виходу двофазного генератора 1, який може змінюватись як за амплітудою, так і за фазою. Отримана в такий спосіб внесена напруга $u_{\text{вн}}(t) = u(t) - u_0(t)$ підсилюється підсилювачем 4 та подається на аналогово-цифровий перетворювач 5, і далі через цифровий інтерфейс 6 до персонального комп'ютера 7. Останній здійснює керування параметрами сигналу компенсації, роботою підсилювача 4 та аналого-цифрового перетворювача 5, реалізує дискретне ПГ, обчислює амплітудні та фазові характеристики сигналів, відображає всю необхідну поточну інформацію, а також ідентифікує сигнали від дефектів.

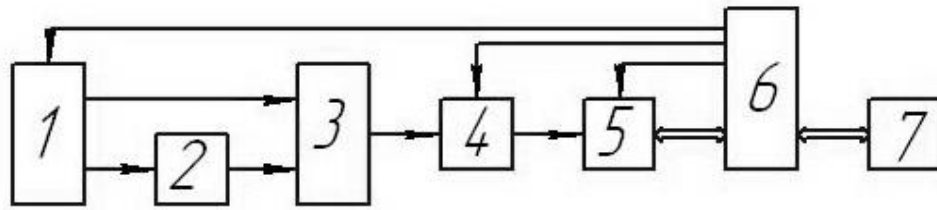


Рис. 2.13. Узагальнена схема системи ВСНК

Аналіз сигналу та відтворення результатів контролю виконуються наступним чином. Для отриманого цифрового представлення сигналу $u_{\text{BH}}(t)$ в персональному комп'ютері програмним шляхом за допомогою ДПГ [96] формують його гільберт-образ $\hat{u}_{\text{BH}}(t) = \mathbf{H}_{\text{д}}[u_{\text{BH}}(t)]$, де $\mathbf{H}_{\text{д}}$ – оператор ДПГ. Обчислення амплітудної та фазової характеристик сигналу проводиться за формулами:

$$A(t) = \sqrt{u_{\text{BH}}^2(t) + \hat{u}_{\text{BH}}^2(t)}, \quad (2.42)$$

$$\Phi(t) = \arctg \frac{\hat{u}_{\text{BH}}(t)}{u_{\text{BH}}(t)} + \mathbf{L}[\hat{u}_{\text{BH}}(t), u_{\text{BH}}(t)], \quad (2.43)$$

де $\mathbf{L}[\hat{u}_{\text{BH}}(t), u_{\text{BH}}(t)]$ – оператор розгортання дискретної ФХС в часі за межі інтервалу $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$. Функція модуляції фази сигналу, яка необхідна для ідентифікації дефектів ОК за відомої частоти сигналу, визначається як:

$$\varphi_M(t) = \Phi(t) - 2\pi f t. \quad (2.44)$$

Функції (2.42) – (2.44) здатні передавати і повільні, і швидкі (в межах одного періоду) зміни характеристик сигналу, які відбуваються внаслідок взаємодії перетворювача і ОК в процесі сканування. Ідентифікація дефектів проводиться шляхом виявлення змін амплітудної та фазової характеристик сигналів, отриманих під час сканування певної ділянки ОК.

На рис. 2.14а зображено приклад графіку сигналу $u_0(t)$ з двофазного генератора, рис. 2.14б – приклад графіку функції $\varphi_M(t)$ модуляції фази

сигналу, рис. 2.14в– амплітуди $U_m(t)$ модульованого сигналу, рис. 2.14г – приклад сигналу $u(t)$, отриманий з $u_0(t)$ шляхом модуляції його фази і амплітуди з використанням функцій $\varphi_M(t)$ та $U_m(t)$, рис. 2.14д – функції $\varphi_M(t)$ (крива 1 – вихідна функція, крива 2 – отримана за результатами аналізу сигналу $U(t)$), рис. 2.14е – амплітудна характеристика сигналу $U_m(t)$ (крива 1 – вихідна функція, крива 2 – отримана за результатами аналізу сигналу $U(t)$).

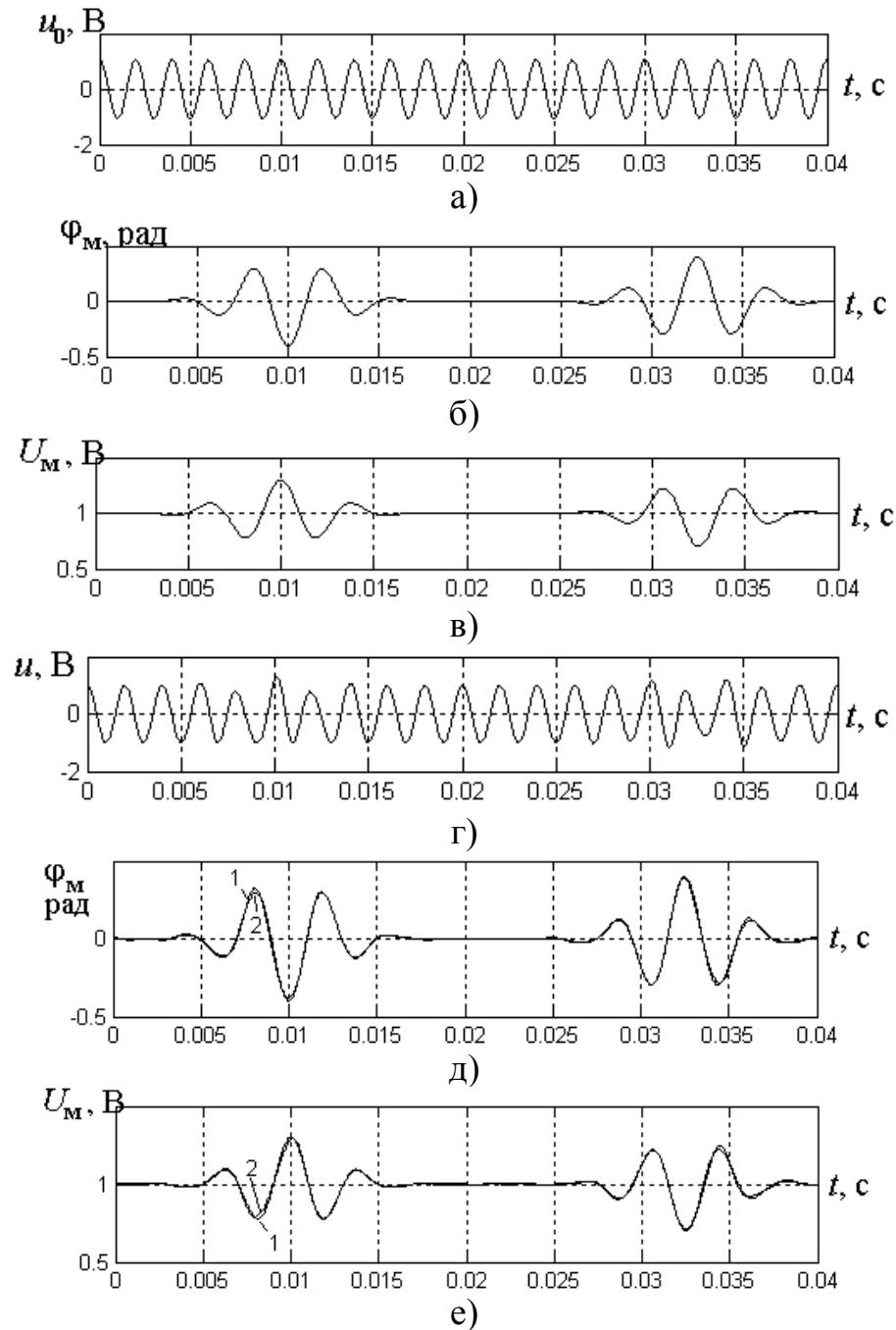


Рис. 2.14. Приклади графіків сигналів з локальною модуляцією дискретних АХС та ФХС

Отримання дискретних АХС та ФХС дозволяє створювати бібліотеки таких характеристик для найбільш типових дефектів і виконувати на цій основі їх ідентифікацію.

Описаний вище спосіб дозволяє підвищити швидкість визначення амплітудних та фазових характеристик інформативного сигналу за рахунок забезпечення можливості оцінювання їх миттєвих значень в умовах сканування об'єкта контролю, слідкувати за зміною амплітудної та фазової характеристик на інтервалах часу, співставних з періодом сигналу, і отримувати значно більші об'єми інформації, що створює можливість застосування статистичних методів аналізу інформації за значних швидкостей сканування ОК.

Висновки до розділу 2

1. Удосконалено фізико-математичну модель системи «ВСП – ОК» за рахунок врахування додаткових ємності та опору в еквівалентній схемі перетворювача, яка дозволила вперше проаналізувати процеси під час формування сигналів ВСП з імпульсним збудженням в режимі холостого ходу та режимі контролю, що підтвердило зв'язок параметрів сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань з параметрами ОК. Запропонована модель враховує паразитні ємності, які за певних умов призводять до виникнення загасаючих коливань у ланцюгах ВСП.

2. Теоретично обґрунтовано вплив параметрів електричного ланцюга первинної котушки перетворювача на його сигнал, за рахунок чого визначено умови виникнення загасаючих гармонічних коливань у ВСП.

3. Виконано аналіз процесів, що мають місце в системах «ВСП – ОК» в умовах імпульсного збудження з перетворювачами різного типу – параметричний, трансформаторний, для ОК з магнітного та немагнітного матеріалів, що дозволило обґрунтувати можливість використання в

імпульсному вихрострумовому контролі нових інформативних параметрів сигналу перетворювача – коефіцієнта загасання та частоти власних коливань, та проаналізувати вплив параметрів системи «ВСП – ОК» на запропоновані інформативні параметри сигналу перетворювача.

4. Уточнено зміст та поняття ІВСНК, яке охоплює формування інформативних параметрів не тільки за амплітудними та часовими характеристиками одиночних імпульсів генерованих в ланцюгах ВСП, але й за амплітудо-часовими та фазо-часовими характеристиками загасаючих гармонічних коливань, які за певних умов виникають в ланцюгах ВСП в імпульсному режимі збудження.

5. Запропоновано спосіб визначення та аналізу дискретних амплітудних та фазових характеристик інформативного сигналу ВСП, який ґрунтується на застосуванні ДПГ, з метою оцінювання миттєвих значень цих характеристик в умовах сканування об'єкта контролю, їх зміни на інтервалах часу, співставних з періодом сигналу, і отримання значно більших об'ємів інформації, що розширює можливості застосування статистичних методів обробки інформації.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО – ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

В даному розділі подано опис інформаційно-діагностичної системи з обґрунтуванням її структури, алгоритм роботи та методи підвищення точності визначення характеристик сигналів ВСП в імпульсному режимі роботи. Подано опис запропонованої методики аналізу сигналів ВСП з імпульсним режимом збудження, проаналізовано стандартну невизначеність вимірювання частоти і коефіцієнта загасання сигналів перетворювача, які отримані з їх амплітудної та фазової характеристик. Виконаний аналіз і отримані формули можуть бути використані для інженерного розрахунку числових значень невизначеностей вимірювання коефіцієнта загасання та частоти власних коливань і обґрунтування рекомендацій щодо вибору тривалості інтервалів спостереження та аналізу сигналу. Результати, отримані в даному розділі, опубліковані в наступних наукових працях [83, 100 – 107].

3.1. Розроблення методів підвищення точності визначення характеристик сигналів вихрострумowego перетворювача в імпульсному режимі

З попередніх досліджень відомо, що характер АХС та ФХС близькі відповідно до експоненційного та лінійного, тому з метою зменшення впливу шумів та підвищення точності визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП запропоновано використання апроксимації амплітудної та лінійного тренду фазової характеристик сигналу ВСП.

3.1.1. Підвищення точності визначення амплітудної характеристики сигналів перетворювача

Для оцінювання ефективності запропонованого методу підвищення точності визначення АХС було проведено моделювання з визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за амплітудною характеристикою цього сигналу в умовах впливу завад [108]. В якості завади було використано гауссовий шум. На часовому інтервалі аналізу відношення сигнал/шум змінювалось від 0,1% (відповідає 60 дБ) до 10%. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП приведено на рис.3.1, а його АХС та її тренд на рис. 3.2. Приклад визначення коефіцієнта загасання та оцінювання його похибки приведено у додатку В.

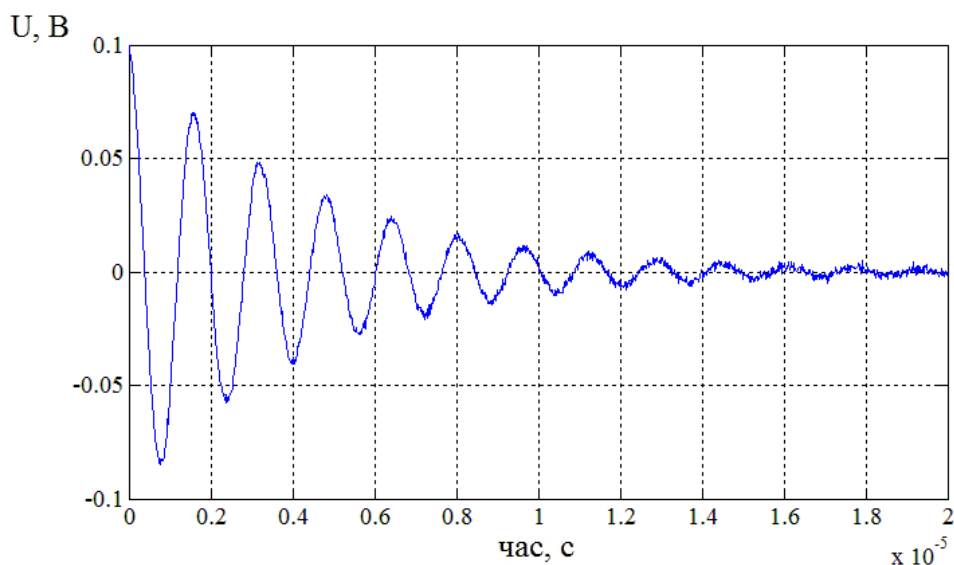


Рис. 3.1. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП

Моделювання проводилось для сигналів з заданим коефіцієнтом загасання α в діапазоні $0,23 \cdot 10^6 \div 0,27 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ з кроком $0,01 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. За результатами проведеного моделювання максимальні відносні похибки визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за АХС та її експоненціальним трендом складає 9% та 3%, відповідно. Таким чином, використання експоненційного тренду АХС дає змогу підвищити точність визначення

коефіцієнта загасання реального сигналу ВСП за запропонованою методикою в ~ 3 рази.

З метою визначення довірчих інтервалів проводилось оцінювання середньоквадратичного відхилення (СКВ) випадкової складової похибки середнього $\bar{\alpha}'$ та індивідуального α'_i ($i = \overline{1, n}$) значень коефіцієнтів загасання, визначених за експоненційним трендом АХС, як функції від α [109, 110]:

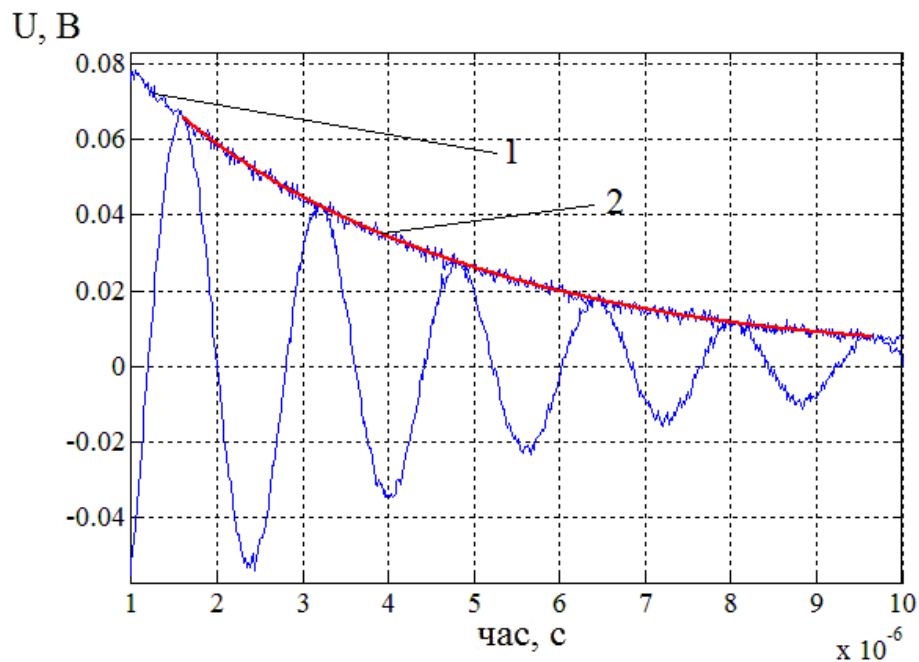


Рис. 3.2. АХС ВСП (крива 1) та її тренд (крива 2)

$$s_{\bar{\alpha}'}(\alpha) = s_{\alpha'} \sqrt{1/n + (\alpha - \bar{\alpha})^2 / \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}, \quad (3.1)$$

$$s_{\alpha'_i}(f) = s_{\alpha'} \sqrt{1 + 1/n + (\alpha - \bar{\alpha})^2 / \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}, \quad (3.2)$$

де $s_{\alpha'} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\alpha'_i - \alpha_i)^2}$ – оцінка СКВ розрахованих значень коефіцієнта загасання α' ; $\bar{\alpha}$ – середнє значення заданого діапазону коефіцієнта загасання.

Довірчий інтервал випадкової похибки середнього та індивідуального значень α' оцінюється за виразами:

$$\Delta_{\alpha'}(\alpha) = t_{\beta/2}(\nu) \cdot s_A(\alpha), \quad (3.3)$$

$$\Delta_{\alpha'}(f) = t_{\beta/2}(\nu) \cdot s_A(\alpha), \quad (3.4)$$

де $t_{\beta/2}(\nu)$ – квантиль розподілу Стюдента для довірчої ймовірності $P = 1 - \beta/2$, $\nu = n - 2$ – ступенів свободи [110, 111]. В проведених дослідях $n = 100$.

Графіки довірчих областей регресії для значень розрахованих коефіцієнтів загасання сигналів ВСП з використанням експоненційного тренду АХС із заданою ймовірністю $P = 0,975$, приведені на рис. 3.3 (крива 1 – довірка область регресії для індивідуальних значень α' , крива 2 – для середніх значень α'). Крім того, на рис. 3.3 (крива 3 – довірка область регресії для індивідуальних значень коефіцієнта загасання сигналу, крива 4 – для середніх значень коефіцієнта загасання) приведено довірчі області для коефіцієнтів загасання сигналів ВСП, що розраховані без використання експоненційного тренду АХС.

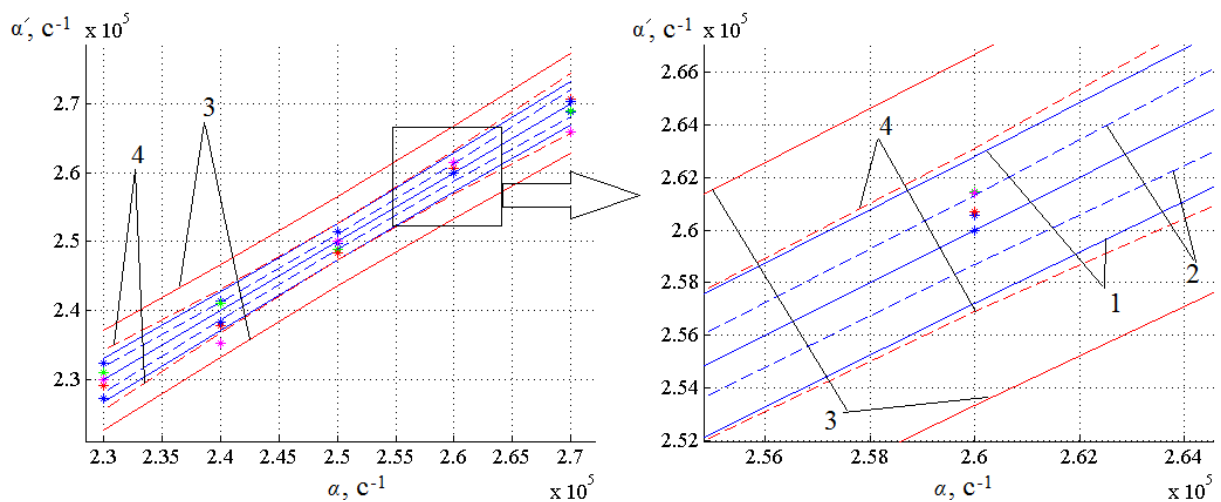


Рис. 3.3. Графіки довірчих областей регресії для значень α'

Отримані результати доводять ефективність використання запропонованого методу підвищення точності визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП на основі його визначення за експоненційним трендом АХС. Слід зазначити, що значення коефіцієнта загасання сигналу є дуже

чутливими до впливу завад та шумів, тому запропонований метод підвищення точності визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП може бути застосований для $U/\sigma > 100$.

3.1.2. Підвищення точності визначення власної частоти сигналів вихрострумового неруйнівного контролю в імпульсному режимі збудження

Для оцінювання ефективності запропонованого методу підвищення точності визначення ФХС було проведено моделювання з визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за фазовою характеристикою цього сигналу в умовах впливу завад. В якості завади було використано гауссовий шум, який складав 0,3% від амплітуди першого стрибка сигналу ВСП та відповідав відношенню сигнал/шум в 50 дБ. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП приведено на рис.3.4, а його ФХС та її лінійний тренд на рис. 3.5. Приклад визначення частоти та оцінювання похибки приведено у додатку Г.

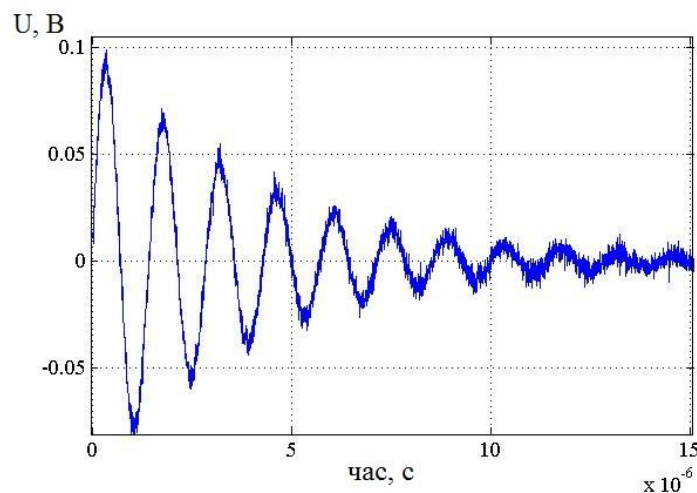


Рис. 3.4. Фрагмент змодельованого сигналу ВСП

Моделювання проводилось для сигналів з заданими частотами f в діапазоні від 620 кГц до 710 кГц з кроком 10 кГц. За результатами

проведеного моделювання максимальні відносні похибки визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за ФХС та її лінійним трендом складає 0.5% та 0.06%, відповідно. Таким чином, використання лінійного тренду ФХС дає змогу підвищити точність визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за запропонованою методикою в 8 разів.

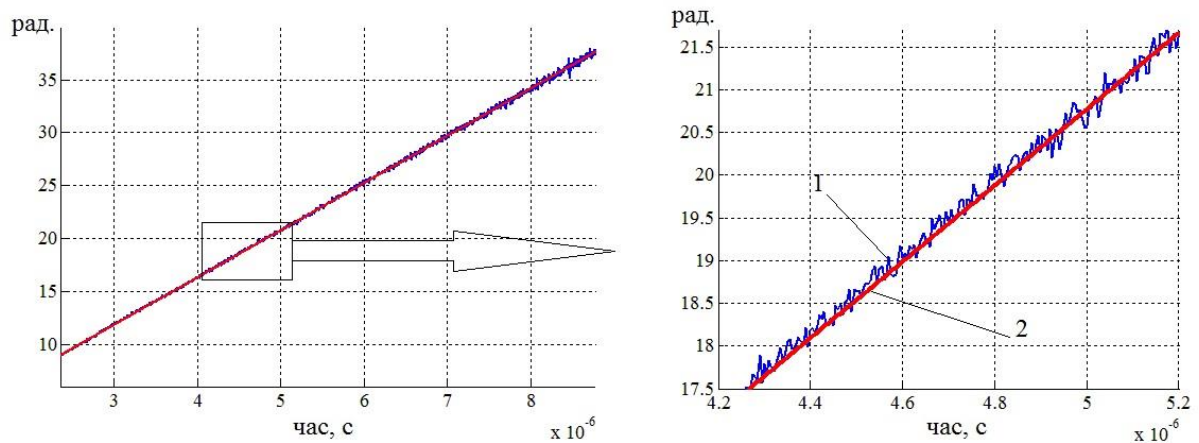


Рис. 3.5. ФХС ВСП (1) та її лінійний тренд (2)

З метою визначення довірчих інтервалів проводилось оцінювання СКВ випадкової складової похибки середнього \bar{F} та індивідуального F_i ($i = \overline{1, n}$) значень частот, визначених за лінійним трендом ФХС, як функції f [109, 110]:

$$s_{\bar{F}}(f) = s_F \sqrt{1/n + (f - \bar{f})^2 / \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}, \quad (3.5)$$

$$s_{F_i}(f) = s_F \sqrt{1 + 1/n + (f - \bar{f})^2 / \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}, \quad (3.6)$$

де $s_F = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (F_i - f_i)^2}$ – оцінка СКВ розрахованих значень частоти F ; \bar{f}

– середнє значення заданого діапазону частот.

Довірчий інтервал випадкової похибки середнього та індивідуального значень F оцінюється за виразами:

$$\Delta_{\bar{F}}(f) = t_{\beta/2}(v) \cdot s_{\bar{F}}(f), \quad (3.7)$$

$$\Delta_F(f) = t_{\beta/2}(\nu) \cdot s_F(f), \quad (3.8)$$

де $t_{\beta/2}(\nu)$ – квантиль розподілу Стюдента для довірчої ймовірності $P = 1 - \beta/2$ та $\nu = n - 2$ – ступенів свободи [110, 111].

Графіки довірчих областей регресії для значень розрахованих частот власних коливань сигналу ВСП з використанням лінійного тренду ФХС із заданою ймовірністю $P = 0,975$, приведені на рис. 3.6 (крива 1 – границі довірчої області регресії для індивідуальних значень F , крива 2 – для середніх значень F). Крім того, на рис. 3.6 (крива 3 – границі довірчої області регресії для індивідуальних значень F' , крива 4 – для середніх значень F') приведено довірчі області для частот власних коливань ВСП, що розраховані без використання лінійного тренду ФХС.

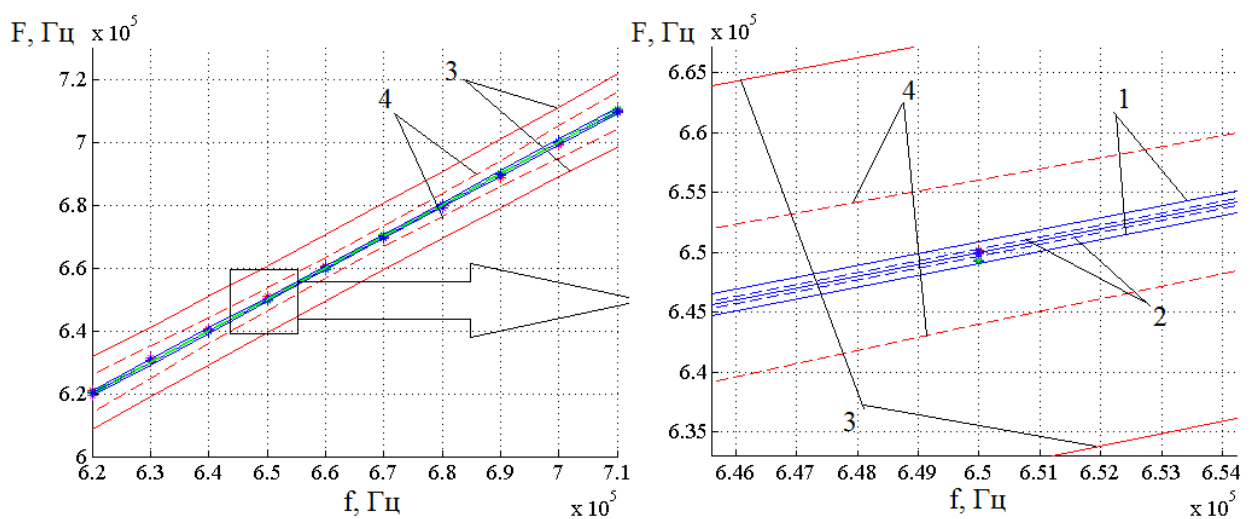


Рис. 3.6. Графіки довірчих областей регресії для значень F

Отримані результати доводять ефективність використання запропонованого методу підвищення точності визначення частоти власних коливань сигналу ВСП на основі її визначення за лінійним трендом ФХС.

3.2. Обґрунтування структури інформаційно - діагностичної системи вихрострумового неруйнівного контролю

Структура розробленої інформаційно - діагностичної системи ВСНК, яка орієнтована на використання різних типів ВСП, а саме трансформаторних прохідного і накладного, приведена на рис. 3.7.

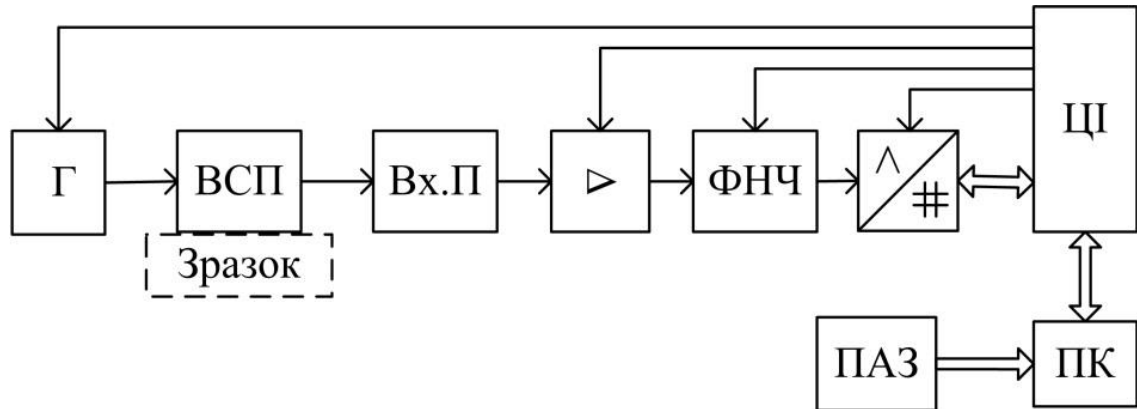


Рис. 3.7. Розроблена система ВСНК з імпульсним і неперервним режимами збудження ВСП

Запропонована система ІВСНК містить: генератор (Г), ВСП, вхідний пристрій (Вх.П), фільтр нижніх частот (ФНЧ), цифровий інтерфейс (ЦІ), персональний комп'ютер (ПК), програмно-алгоритмічне забезпечення (ПАЗ).

З метою забезпечення неперервного та імпульсного режиму збудження ВСП, передбачено два режими роботи генератора: імпульсний ($U_{\max}=30\text{В}$), неперервний ($U_{\max}=5\text{В}$). Дана система ВСНК дозволяє використання різних типів ВСП: параметричний, трансформаторний, мультидиференціальний. Підсилення передбачено на рівні 60дБ, частота зрізу ФНЧ 1МГц, АЦП 8 біт, передбачено частоту дискретизації до 200МГц. Підключення системи відбувається через USB інтерфейс.

На первинну котушку ВСП надходить імпульсний сигнал від генератора, параметри сигнала якого можуть змінюватись за потребою користувача. Сигнал вимірювальної котушки ВСП підсилюється та фільтрується і оцифровується АЦП. Отримані дані записуються до буферного регістра пам'яті, що входить до складу ЦІ, та передаються до ПК з необхідним ПАЗ

для подальшої обробки та аналізу. Синхронізацію роботи основних елементів системи забезпечує блок управління, що міститься в ЦІ.

Перевагами запропонованої інформаційно - діагностичної системи ВСНК є комбінація режимів збудження ВСП, можливість використання різних типів ВСП та отримання більш повної інформації про параметри та характеристики ОК за рахунок багатопараметровості, що реалізується даною системою.

3.3. Алгоритм роботи інформаційно - діагностичної системи вихрострумового неруйнівного контролю

Алгоритм роботи розробленої інформаційно - діагностичної системи ВСНК базується на запропонованій методиці аналізу сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження, детальний опис та приклади реалізації якої подано в цьому розділі та розділі 4.



Рис. 3.8. Структура програмно-алгоритмічного забезпечення інформаційно - діагностичної системи ВСНК

Узагальнена структура алгоритмічного забезпечення інформаційно - діагностичної системи ВСНК представлена на рис. 3.8. Блок формування вибірки та вибору ділянки аналізу сигналу ВСП в умовах його імпульсного

збудження передбачає вибір ділянки загасаючого гармонічного коливання в декілька періодів до моменту коли рівень сигналу ВСП перевищує рівень шумів та завад. Блок аналізу сигналів ВСП передбачає визначення гільберт-образу цих сигналів з метою отримання дискретних АХС та ФХС сигналів ВСП.

З метою підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП передбачено застосування методів згладжування АХС та ФХС у відповідному блоці (для АХС – застосування амплітудної апроксимації, для ФХС – визначення лінійного тренду). Крім того, для підвищення точності визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за АХС застосовується ітераційний метод визначення оптимального інтервалу аналізу цієї характеристики з урахування умови $\Delta T\alpha \approx 1.1089$ (п.3.5).

Блок оцінювання параметрів ОК проводить їх визначення за значеннями інформативних параметрів сигналів ВСП шляхом порівняння з аналогічними параметрами еталонного ОК, отриманими згідно тієї ж методики. Відображення результатів можливе в цифровій та графічній формах.

3.4. Методика аналізу інформаційних сигналів в інформаційно-діагностичній системі імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю

Розроблена методика ґрунтується на отриманих у розділі 2 результатах аналізу системи «ВСП-ОК», де обґрунтовано необхідність врахування в еквівалентній схемі такої системи міжвитковою ємності C_1 (рис. 2.2), та враховує особливості апаратно-програмної реалізації системи ІВСНК. Зазвичай, в розрахунках та аналізі роботи ВСП у стаціонарному режимі ємністю C_1 нехтують та не беруть до розрахунків, що практично не впливає на результати аналізу. Однак у випадку живлення багатовиткових ВСП від імпульсних джерел збудження такою ємністю не можна нехтувати – її

наявність разом з іншими паразитними ємностями призводить до появи в котушці власних загасаючих гармонічних коливань.

Об'єкт контролю, представлений на еквівалентній схемі на рис. 2.2 індуктивно зв'язаним з котушкою ВСП короткозамкненим контуром, вносить в коливальний контур ВСП додаткові індуктивність $L_2(\bar{w})$ та активний опір $R_2(\bar{w})$, які певним чином пов'язані залежністю з вектором параметрів ОК \bar{w} , та які змінюють коефіцієнт загасання та частоту власних коливань в системі ВСП–ОК. Цей факт дозволив запропонувати для ВСП нові параметри – коефіцієнт загасання та частоту власних коливань, визначених за АХС і ФХС ВСП.

Структура та опис розробленої системи ВСНК, яка орієнтована на використання трансформаторних ВСП прохідного і накладного типів, наведена у розділі 3 (рис. 3.7).

Модель інформаційного сигналу ВСП представляється у вигляді адитивної суміші загасаючих гармонічних коливань та гауссового шуму:

$$u_{\text{всп}}(t, \bar{w}) = U_m(\bar{w}) e^{-\alpha(\bar{w})t} \cdot \cos(2\pi f(\bar{w})t) + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (3.9)$$

де U_m – амплітудне значення інформаційної складової сигналу ВСП, $\alpha(\bar{w})$ – коефіцієнт загасання сигналу, $f(\bar{w})$ – частота коливань сигналу, t – поточний час, (t_1, t_2) інтервал часу аналізу сигналу ВСП, $u_{\text{ш}}(t)$ – шумова складова сигналу, \bar{w} – вектор параметрів та характеристик ОК. В залежності від характеристик ОК – електрофізичних параметрів матеріалу, форми та геометричних розмірів, наявних дефектів, товщини діелектричного покриття – змінюється власна частота і коефіцієнт загасання цих коливань. В АЦП сигнал (3.9) перетворюється в цифрову форму $u_{\text{всп}}[j, \bar{w}]$, де j – номер відліку (ціла частина відношення t/T_d , T_d – період дискретизації).

Порядок обробки сигналів ВСП з імпульсним збудженням проілюстровано на рис. 3.9. В якості інформативних параметрів сигналів розглядалися їх коефіцієнт загасання і частота.

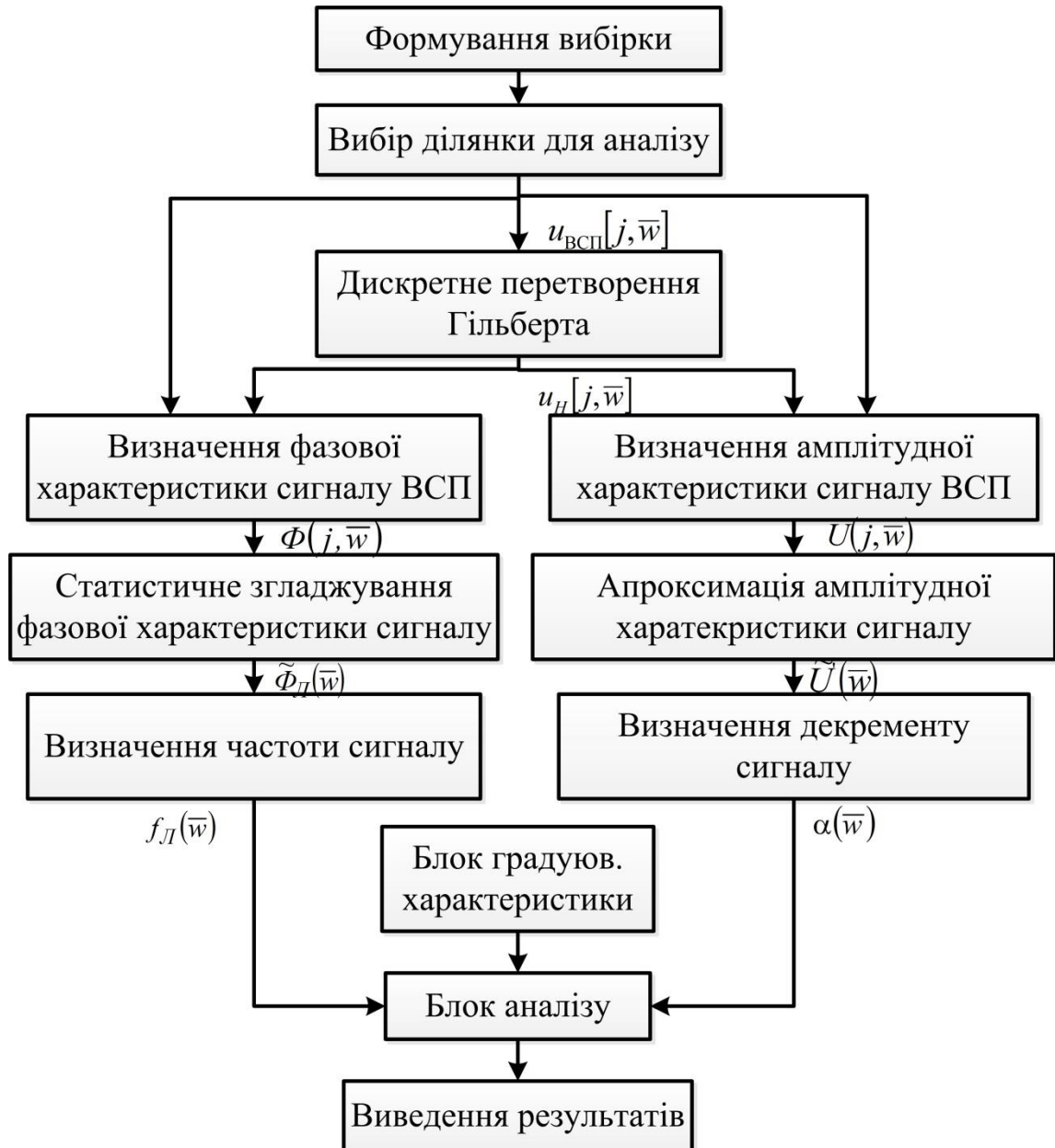


Рис. 3.9. Умовне графічне зображення процесу аналізу сигналів імпульсного ВСП

Процес обробки та аналізу характеристик інформаційних сигналів ВСП полягав у наступному:

1) імпорт вихідної вибірки сигналу $u_{\text{ВСП}}[j, \bar{w}]$ (в режимі аналізу експериментальних даних останні надходять з буферного регістра пам'яті

через ЦІ, а в режимі моделювання – з внутрішнього генератора; система забезпечує можливість завантаження даних з файлів різного типу (txt, xls, bin, csv, lvm та інш.);

2) з огляду на загасаючий характер інформаційних сигналів перетворювача та його малу тривалість в часі (не більше 10 періодів несучої) з метою зменшення впливу завад при подальшому визначенні амплітудної та фазової характеристики проводився вибір ділянки аналізу сигналу. Встановлено, що для підвищення точності подальших результатів особливо важливо врахувати ділянку сигналу, яка відповідає першим періодам інформаційного сигналу вихрострумового перетворювача, тобто періодам з найбільшими значеннями амплітудної характеристики;

3) визначення гільберт - образу сигналів ВСП:

$$u_H[j, \bar{w}] = \mathbf{H}_d[u_{\text{всп}}[j, \bar{w}]]; \quad (3.10)$$

4) визначення дискретних фазових та амплітудних характеристик інформаційних сигналів (ФХС та АХС) ВСП:

$$\Phi[j, \bar{w}] = \arctg \frac{u_H[j, \bar{w}]}{u_{\text{всп}}[j, \bar{w}]} + \mathbf{L}(u_H[j, \bar{w}], u_{\text{всп}}[j, \bar{w}]), \quad (3.11)$$

$$U[j, \bar{w}] = \sqrt{u_{\text{всп}}^2[j, \bar{w}] + u_H^2[j, \bar{w}]}; \quad (3.12)$$

5) згладжування функції (3.11) за методом визначення лінійної регресії Бартлетта-Кенуя [109]. В основі методу лежить упорядкування експериментальних даних за часом t і поділ аналізованої частини вибірки $\Phi[j, \bar{w}]$ на три рівні групи обсягом M . У кожній групі знаходять суми виду $\sum \Phi[j, \bar{w}]$ та $\sum t_j$ – відповідно Φ_1, Φ_2, Φ_3 і t_1, t_2, t_3 . Коефіцієнти лінійної регресії оцінюються співвідношеннями:

$$k = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{t_3 - t_1}, \quad b = \bar{\Phi} - k\bar{t} \quad \text{або} \quad b = \frac{\Phi_2}{M} - k \cdot \frac{t_2}{M}, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \bar{\Phi} = \frac{\sum \Phi[j, \bar{w}]}{3M} \quad \text{та} \quad \bar{t} = \frac{\sum t_j}{3M};$$

6) визначення частоти сигналів ВСП з лінійного тренду функції (3.11):

$$f_{\text{л}}(\bar{w}) = \frac{\Delta \tilde{\Phi}_{\text{л}}[\Delta T, \bar{w}]}{2\pi \Delta T}, \quad (3.14)$$

де $\Delta \tilde{\Phi}_{\text{л}}[\Delta T, \bar{w}]$ – накопичена за час $\Delta T = t_2 - t_1$ фаза сигналу ВСП, отримана за функцією лінійної регресії;

7) застосування експоненціальної апроксимації функції (3.12) для підвищення точності визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП. Для підвищення точності оцінювання коефіцієнтів експоненціальної апроксимації враховується ділянка АХС, яка відповідає першим періодам інформаційного сигналу ВСП, тобто періодам з найбільшою крутістю АХС;

8) визначення коефіцієнтів загасання сигналів ВСП за формулою:

$$\alpha(\bar{w}) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', \bar{w})}{\hat{U}(t_2', \bar{w})}. \quad (3.15)$$

де $\hat{U}(t_1', \bar{w})$, $\hat{U}(t_2', \bar{w})$ – значення апроксимаційних кривих в моменти часу t_1' і t_2' , $\Delta T = t_2' - t_1'$;

9) аналіз отриманих результатів шляхом порівняння з градуювальною характеристикою залежності вимірюваного параметру ОК від інформативного параметру сигналу ВСП;

10) візуалізація отриманих результатів.

Методика аналізу сигналів ВСП для побудови градуювальної характеристики також може бути представлена рис. 3.9 (блок градуювальної характеристики з рис. 3.10). В цілому методика отримання градуювальної

характеристики подібна до методики аналізу експериментальних даних з тією відмінністю, що потребує контрольних зразків із відомими параметрами та характеристиками досліджуваних властивостей ОК w_{ij} , де i – тип параметра ОК, j – значення параметру ОК.

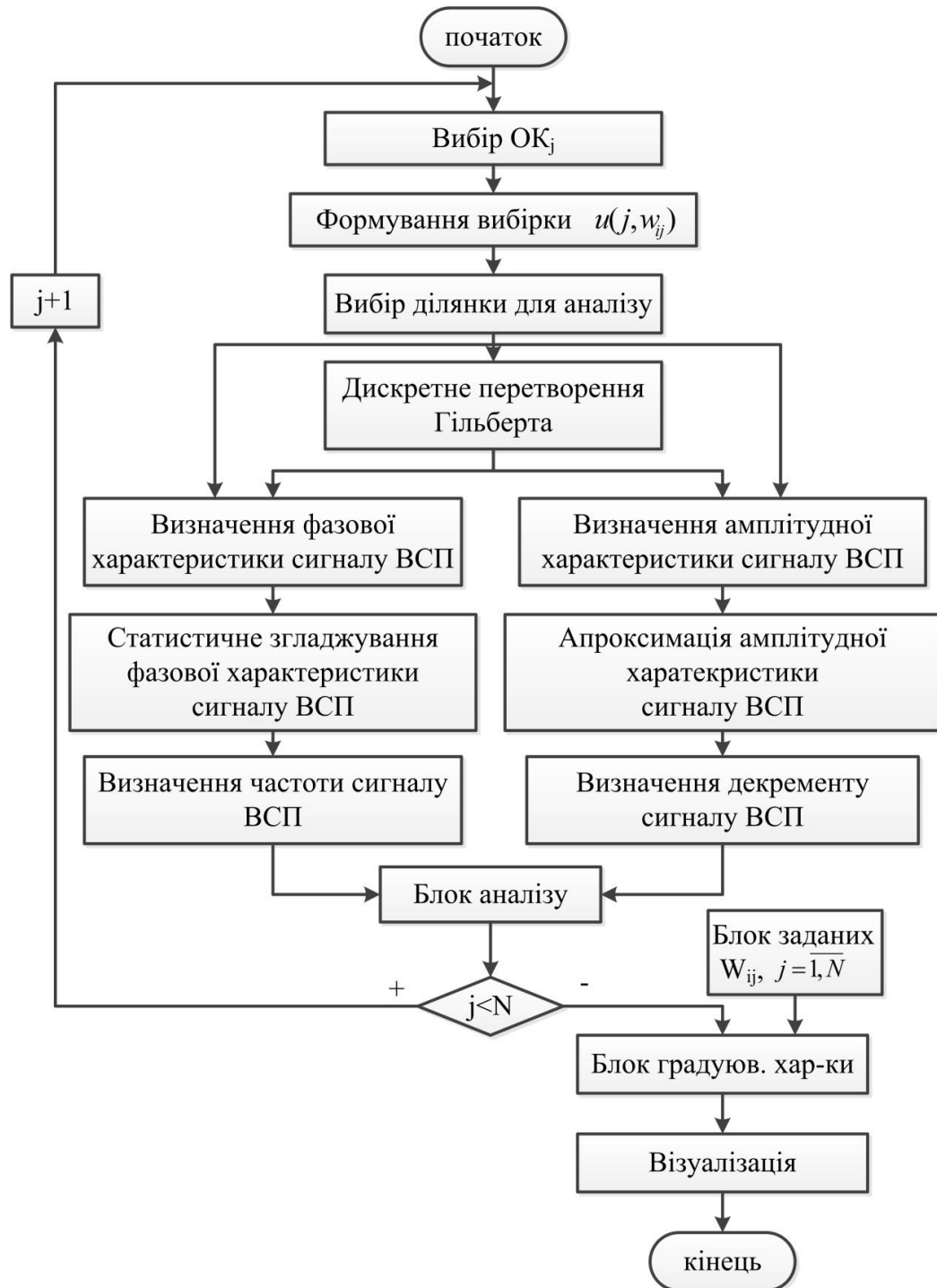


Рис. 3.10. Графічне представлення методики аналізу інформаційних сигналів ВСП (блок градуювальної характеристики)

Розроблена методика дозволяє проводити аналіз інформативних параметрів сигналів ВСП в часовій області та забезпечує зменшення похибки оцінювання параметрів та характеристики ОК за рахунок методів статистичної обробки експериментальних даних.

3.5. Аналіз невизначеності вимірювання характеристик сигналів вихрострумowego перетворювача

Вірогідність результатів імпульсного ВСНК суттєво залежить від точності вимірювання параметрів сигналів ВСП. Зокрема до числа таких параметрів належать частота і коефіцієнт загасання загасаючих гармонічних коливань, які за певних умов виникають у імпульсному режимі роботи перетворювача. Процес оцінювання цих параметрів супроводжується виникненням як випадкової складової похибки, яка обумовлена дією шумів і завад різної природи, так і методичної складової, що визначається особливостями застосованих цифрових методів аналізу сигналів та режимів отримання експериментальних даних [112, 113].

З метою аналізу стандартної невизначеності вимірювання частоти власних коливань сигналу ВСП розглянемо фазову характеристику цього сигналу, що визначається за допомогою ПГ сигналу перетворювача $s(t)$ за формулою:

$$\Phi(t) = \arctg \frac{\hat{s}(t)}{s(t)} + L[s(t), \hat{s}(t)], \quad (3.16)$$

де $\hat{s}(t)$ – гільберт-образ сигналу $s(t)$, $L[\cdot]$ – ступінчаста функція, що усуває розриви ФХС.

З урахуванням (3.16) та некорельованості складових $s(t)$ та $\hat{s}(t)$ у співпадаючі моменти часу сумарна стандартна невизначеність оцінки значень ФХС дорівнює:

$$u_{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\hat{s}}\right)^2 u_{\hat{s}}^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial s}\right)^2 u_s^2}, \quad (3.17)$$

де $\frac{\partial\Phi}{\partial\hat{s}}$ та $\frac{\partial\Phi}{\partial s}$ – коефіцієнти впливу, $u_{\hat{s}}$ – стандартна невизначеність оцінювання значень гільберт-образу сигналу ВСП, u_s – стандартна невизначеність вимірювання сигналу ВСП. Невизначеність оцінки значень сигналу: $u_s = u_{\hat{s}} = u$, а отже вираз (3.17) можна записати як:

$$u_{\varphi} = u \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\hat{s}}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial s}\right)^2}. \quad (3.18)$$

Після диференціювання (3.16) отримаємо коефіцієнти впливу [114]:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\hat{s}} = \frac{s(t)}{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial s} = -\frac{\hat{s}(t)}{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}. \quad (3.20)$$

Отже, формула (3.18) може бути записана як:

$$u_{\varphi} = \frac{u}{\sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}} = \frac{u}{S(t)}, \quad (3.21)$$

де $S(t)$ – обвідна сигналу.

Невизначеність оцінювання значень частоти власних коливань сигналу визначається через значення ФХС як:

$$f = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{2\pi\Delta T} = \frac{\varphi_2}{2\pi\Delta T} - \frac{\varphi_1}{2\pi\Delta T} + \frac{L[s_{1(2)}, \hat{s}_{1(2)}]}{2\pi\Delta T}, \quad (3.22)$$

де $\Phi_{1(2)} = \varphi_{1(2)} + L[s_{1(2)}, \hat{s}_{1(2)}]$.

Припустимо, що $L[.]$ отримано без грубої помилки, тоді сумарна стандартна невизначеність оцінки визначення частоти власних коливань сигналу визначається:

$$u_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \varphi_1}\right)^2 u_{\varphi_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi_2}\right)^2 u_{\varphi_2}^2}, \quad (3.23)$$

де $\frac{\partial f}{\partial \varphi_1}$ та $\frac{\partial f}{\partial \varphi_2}$ – коефіцієнти впливу, u_{φ_1} та u_{φ_2} – стандартні невизначеності оцінки значень ФХС в моменти часу t_1 та t_2 , відповідно, що визначаються формулою (3.21).

Після диференціювання (3.22) отримаємо коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi_1} = -\frac{1}{2\pi\Delta T}, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi_2} = \frac{1}{2\pi\Delta T}. \quad (3.25)$$

Таким чином, враховуючи (3.21), (3.24) та (3.25), вираз (3.23) можна переписати як:

$$u_{\varphi} = \frac{u}{2\pi\Delta T} \sqrt{\frac{1}{s_1^2(t) + \hat{s}_1^2(t)} + \frac{1}{s_2^2(t) + \hat{s}_2^2(t)}}. \quad (3.26)$$

Беручи до уваги, що $s_1^2 + \hat{s}_1^2 = S_1^2$ та $s_2^2 + \hat{s}_2^2 = S_2^2$ є обвідними сигнала, та $S_2 = S_1 e^{-\alpha\Delta T}$, маємо:

$$u_{\varphi} = \frac{u}{2\pi S_1} \cdot \frac{1}{\Delta T} \cdot \sqrt{1 + e^{2\alpha\Delta T}}. \quad (3.27)$$

Проаналізуємо отриманий вираз (3.27) на наявність екстремума шляхом його диференціювання:

$$\frac{\partial u_f}{\partial \Delta T} = \frac{A}{\Delta T \sqrt{1 + e^{2\alpha \Delta T}}} \left[\alpha e^{2\alpha \Delta T} - \frac{1}{\Delta T} (1 + e^{2\alpha \Delta T}) \right], \quad (3.28)$$

де $A = \frac{u}{2\pi S_1}$. Прирівнявши вираз (3.28) до нуля, отримаємо:

$$\alpha \Delta T e^{2\alpha \Delta T} = 1 + e^{2\alpha \Delta T}. \quad (3.29)$$

Виконаємо заміну $x = \alpha \Delta T$, де $x \in (0 \dots \infty)$:

$$e^{2x} = \frac{1}{x-1}, \quad (3.30)$$

або

$$\ln(x-1) = -2x. \quad (3.31)$$

Рівняння (3.31) є трансцендентним та вирішується графічним методом, який полягає в тому, що необхідно прирівняти частини рівняння із залежною змінною до частин рівняння із незалежною змінною і побудувати графіки функцій, отриманих по обидва боки знаку рівності (рис. 3.11).

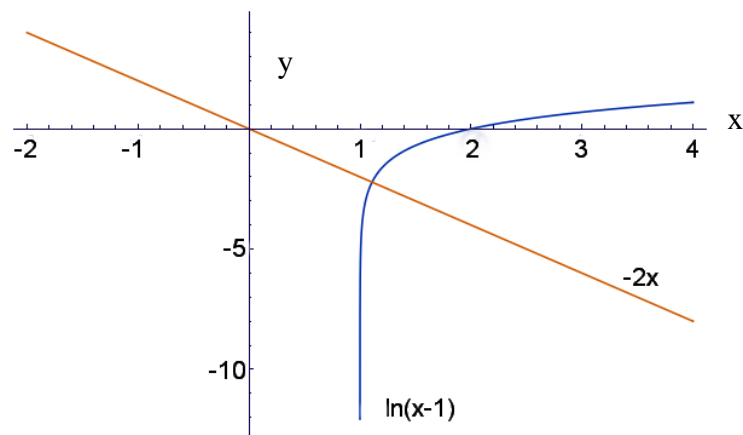


Рис. 3.11. Графіки функцій трансцендентного рівняння

Розв'язком рівняння (3.31) є точка перетину графіків на рис. 3.11, що відповідає значенню:

$$x = \alpha \Delta T \cong 1.1089.$$

Таким чином мінімальна похибка визначення частоти буде мати місце для $\Delta T \approx \frac{1.1089}{\alpha}$, а мінімальна сумарна стандартна невизначеність оцінки визначення частоти власних коливань сигналу рівна:

$$u_{f \min} = \frac{u}{2\pi \Delta T S_1} \sqrt{1 + e^{2 \cdot 1.1089}} \approx \frac{u}{2 \Delta T S_1}.$$

Найбільший вплив на величину u чинять наступні фактори:

- 1) наявність у складі аналізованого сигналу шуму з дисперсією σ_{ui}^2 ;
- 2) похибка квантування, дисперсія якої дорівнює:

$$\sigma_{kv}^2 = \frac{\Delta S_{kv}^2}{12} = \frac{S_n^2}{2^{2n+2} \cdot 3},$$

де ΔS_{kv} – ступінь квантування АЦП, n – розрядність АЦП, S_n – номінальне значення напруги АЦП. Тоді величина u може бути визначена як:

$$u \cong \sqrt{\sigma_{ui}^2 + \sigma_{kv}^2} = \sqrt{\sigma_{ui}^2 + \frac{S_n^2}{2^{2n+2} \cdot 3}}.$$

З метою аналізу стандартної невизначеності оцінки загасання сигналу ВСП розглянемо формулу визначення коефіцієнта загасання сигналу перетворювача $s(t)$:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{S_1}{S_2}, \quad (3.32)$$

де S_1, S_2 – значення обвідних для моменту часу $t = 0$ та $t = \Delta T$. Тоді сумарна стандартна невизначеність оцінки загасання сигналу ВСП рівна:

$$u_{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta T}\right)^2 u_{\Delta T}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial S_1}\right)^2 u_{S_1}^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial S_2}\right)^2 u_{S_2}^2}, \quad (3.33)$$

де коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta T} = -\frac{1}{\Delta T^2} \ln \frac{S_1}{S_2}; \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial S_1} = \frac{1}{\Delta T S_1}; \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial S_2} = -\frac{1}{\Delta T S_2}; \quad (3.36)$$

$u_{\Delta T}$ – стандартна невизначеність оцінювання часового інтервалу, визначається стабільністю генератора тактових імпульсів і може бути прийнята $u_{\Delta T} = 0$; u_{S_1} та u_{S_2} – стандартна невизначеність оцінювання значень обвідної сигналу ВСП.

Розглянемо амплітудну характеристику сигналу ВСП, що визначається за допомогою ПГ сигналу перетворювача $s(t)$ за формулою:

$$S(t) = \sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}. \quad (3.37)$$

Відповідно, обвідна в моменти часу $t = 0$ та $t = \Delta T$ визначається:

$$S_1|_{t=0} = \sqrt{s_1^2(0) + \hat{s}_1^2(0)}. \quad (3.38)$$

$$S_2|_{t=\Delta T} = \sqrt{s_2^2(\Delta T) + \hat{s}_2^2(\Delta T)}. \quad (3.39)$$

Сумарні стандартні невизначеності оцінки значень обвідних $u_{S_{1(2)}}$ можна визначити як результат непрямого вимірювання. Враховуючи коефіцієнти впливу:

$$\frac{\partial S_1}{\partial s_1} = \frac{s_1}{\sqrt{s_1^2 + \hat{s}_1^2}}, \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial \hat{s}_1} = \frac{\hat{s}_1}{\sqrt{s_1^2 + \hat{s}_1^2}}, \quad (3.41)$$

Таким чином, сумарна стандартна невизначеність оцінки значень обвідної для (3.38) визначається:

$$u_{s_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_1}{\partial s_1}\right)^2 u_{s_1}^2 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial \hat{s}_1}\right)^2 u_{\hat{s}_1}^2}. \quad (3.42)$$

Враховуючи, що $u_{s_1} = u_{\hat{s}_1} = u$ та (3.40), (3.41), маємо:

$$u_{s_1} = \sqrt{\frac{s_1^2}{s_1^2 + \hat{s}_1^2} u^2 + \frac{\hat{s}_1^2}{s_1^2 + \hat{s}_1^2} u^2} = u.$$

Сумарна стандартна невизначеність оцінки значень обвідної u_{s_2} визначається аналогічно u_{s_1} , та рівна u .

Тоді вираз (3.33) можна записати як:

$$u_\alpha = \frac{u}{\Delta T} \sqrt{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2}}. \quad (3.43)$$

Проаналізуємо отриманий вираз (3.43) на наявність екстремума шляхом його диференціювання, попередньо виконавши заміну $S_2 = S_1 e^{-\alpha \Delta T}$:

$$u_\alpha = \frac{u}{\Delta T S_1} \sqrt{1 + e^{2\alpha \Delta T}}. \quad (3.44)$$

Отримане рівняння (3.44) по своїй структурі подібне до рівняння (3.27), тому мінімальна сумарна стандартна невизначеність оцінки визначення загасання сигналу ВСП має місце при $\Delta T \approx \frac{1.1089}{\alpha}$. Отже:

$$u_{\alpha.\min} = \frac{u}{\Delta TS_1} \sqrt{1 + e^{2 \cdot 1.1089}} \approx \frac{\pi u}{2 \Delta TS_1}.$$

Проведений аналіз похибок визначення частоти власних коливань та коефіцієнта загасання сигналу ВСП дозволяє визначити оптимальний час для аналізу цього сигналу, що може суттєво вплинути на результати контролю в умовах дії завад і шумів. Умова для отримання мінімальної похибки визначення коефіцієнта загасання сигналу, $\Delta T \approx \frac{1.1089}{\alpha}$, використана при моделюванні, результати якого приведено в п.3.1.1.

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано методи підвищення точності визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП на основі їх визначення за трендами АХС та ФХС. Ефективність запропонованих методів встановлена за допомогою моделювання визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП в умовах впливу завад (на часовому інтервалі аналізу відношення сигнал/шум відповідало 50 дБ).

2. За результатами проведеного моделювання встановлено, що:

- максимальні відносні похибки визначення коефіцієнта загасання сигналу ВСП за АХС та її експоненційним трендом складає 9% та 3%, відповідно. Це свідчить про те, що використання експоненційного тренду АХС дає змогу підвищити точність визначення коефіцієнта загасання реального сигналу ВСП за запропонованою методикою в ~ 3 рази;

- максимальні відносні похибки визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за ФХС та її лінійним трендом складає 0.5% та 0.06%, відповідно. Таким чином, використання лінійного тренду ФХС дає змогу підвищити точність визначення частоти власних коливань сигналу ВСП за запропонованою методикою в ~ 8 разів.

3. Обґрунтовано структуру інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК, в якій в якості нових параметрів сигналів ВСП використано власну частоту та коефіцієнт загасання сигналу ВСП, та передбачено можливість комбінації режимів збудження та використання різни типів вирострумів перетворювачів.

4. Розроблено методику аналізу сигналів ВСНК, що дозволяє визначити їх фазові та амплітудні характеристики на основі перетворення Гільберта сигналів, що може бути реалізована як у складі системи, так і автономно для проведення модельних експериментів для різних задач ВСНК.

5. Проаналізовано похибки визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП за їх амплітудною та фазовою характеристиками, на основі чого запропоновано та обґрунтовано критерій вибору часового інтервалу аналізу сигналів ВСП для мінімізації цих похибок шляхом коригування часового інтервалу аналізу характеристик сигналів ВСП. Встановлено, що для отримання мінімальної похибки визначення коефіцієнта загасання α та частоти власних коливань сигналу, необхідний час аналізу цього сигналу складає $\Delta T \approx 1.1089/\alpha$.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО - ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В даному розділі наведено результати модельних досліджень процесів формування сигналів ВСП та результати експериментальних досліджень роботи різних типів ВСП в режимі імпульсного збудження, а також результати аналізу сигналів ВСП в часовій області отримані в режимі контролю реальних об'єктів. Досліджено вплив різних параметрів та характеристик ОК на інформативні параметри сигналів перетворювача. Результати, отримані в даному розділі, опубліковані в наступних наукових працях [82, 102, 115 – 132].

4.1. Модельні дослідження процесів в системі «параметричний вихрострумний перетворювач – об'єкт контролю»

Для проведення модельних досліджень було створено алгоритмічне забезпечення, яке містить реалізацію пошуку інформативних параметрів сигналу відповідно до параметрів електричної схеми системи «параметричний ВСП – немагнітний ОК» з підключенням до генератора імпульсних сигналів. Структура алгоритмічного забезпечення приведена на рис. 4.1 та базується на вирішенні характеристичного рівняння еквівалентної схеми «ВСП – ОК».

Лістинг програмного коду для розрахунку частоти власних коливань та коефіцієнта загасання сигналу параметричного ВСП приведено в Додатку Д. Дана програма може бути використана для моделювання залежності параметрів інформаційних сигналів від параметрів моделі «ВСП–ОК».

Результати моделювання для вихідних даних, які відповідають приблизним умовам проведення експериментів (рис. 2.1 та рис. 2.2) зведено до таблиці 4.1. та проілюстровано на рис. 4.2.



Рис. 4.1. Структура алгоритмічного забезпечення для модельних досліджень імпульсного режиму роботи системи «ВСП–ОК»

Таблиця 4.1. Результати моделювання

Параметри моделі А: R=1 кОм, C ₁ =28 пФ, R ₁ =10 Ом, L ₁ =7 мГн, M=0.3, R ₂ =10 кОм						
L ₂ , мкГн	1	4	8	12	16	20
$\alpha \cdot 10^{-6}$	4,2863	4,2860	4,2856	4,2852	4,2848	4,2844
$f \cdot 10^{-5}$	2,7796	2,7826	2,7865	2,7905	2,7945	2,7984

Параметри моделі Б:

$R=1$ кОм, $C_1=28$ пФ, $R_1=10$ Ом, $L_1=7$ мГн, $M=0.3$,
 $L_2=13$ мкГн

R_2 , кОм	5	6	7	8	9	10
$\alpha \cdot 10^{-6}$	3,9286	4,0006	4,0726	4,1446	4,2167	4,2887
$f \cdot 10^{-5}$	3,6428	3,4800	3,3132	3,1417	2,9648	2,7813

Графіки на рис. 4.2а та рис. 4.2б отримані за умови зміни параметрів та характеристик ОК, що відображаються в зміні індуктивності L_2 в діапазоні 1 мкГн ÷ 20 мкГн та $R_2 = \text{const}$. На рис. 4.2в та рис. 4.2г приведені графіки отримані за умови зміни параметрів та характеристик ОК, що відображаються в зміні опору R_2 в діапазоні 5 кОм ÷ 10 кОм та $L_2 = \text{const}$. Детальні параметри моделей приведені у таблиці 4.1.

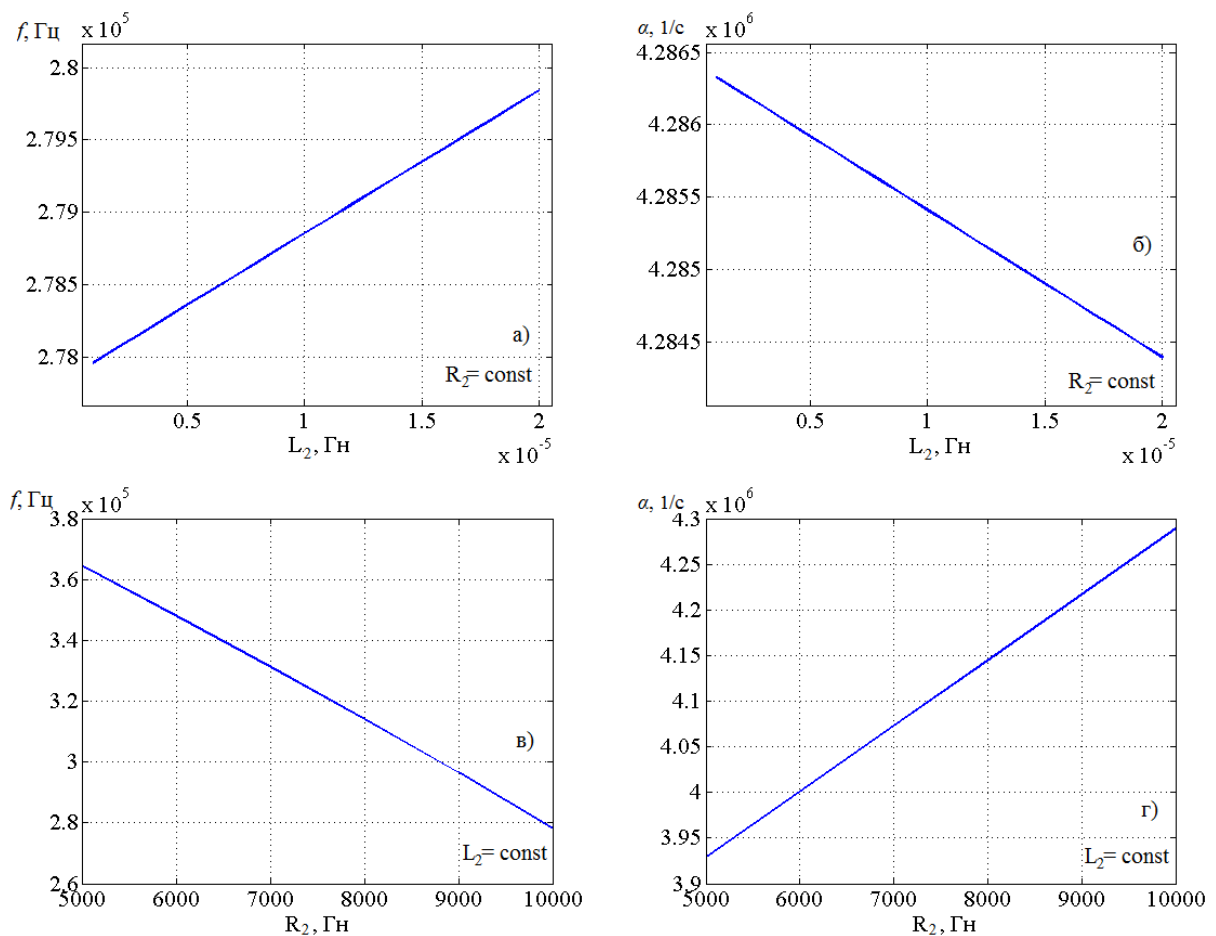


Рис. 4.2. Структура алгоритмічного забезпечення для модельних досліджень імпульсного режиму роботи системи «ВСП–ОК»

Проведені модельні дослідження на базі створеного алгоритмічного забезпечення дає можливість аналізувати інформативні параметри сигналу ВСП у відповідності до параметрів електричної схеми системи «ВСП – ОК».

4.2. Реалізація аналізу сигналів імпульсного вихрострумowego контролю в часовій області аналізу

Розроблений спосіб аналізу сигналів імпульсного ВСП розглянуто на прикладах визначення діаметру циліндричного об'єкта та електропровідності його матеріалу.

В основу способу покладено залежність частоти і коефіцієнта загасання сигналу-відгуку перетворювача від діаметру ОК та електропровідності матеріалу цього об'єкту, який отримано шляхом збудження трансформаторного прохідного ВСП імпульсом струму прямокутної форми. В цьому випадку у ВСП має місце перехідний процес як відгук на фронти збуджуючого сигналу. Визначення гільберт-образу сигналу-відгуку дає змогу визначити його амплітудну та фазову характеристики, за якими оцінюють діаметр і питому електропровідність матеріалу об'єкта.

Застосування імпульсного збудження трансформаторного прохідного ВСП та визначення амплітудної та фазової характеристик сигналу цього перетворювача дозволяє провести оцінювання діаметру об'єкта контролю та питомої електропровідності матеріалу цього об'єкту.

На рис.4.3 зображено схему апаратно - програмного засобу, що реалізує запропонований спосіб, яка містить 1 – імпульсний генератор, 2 – вихрострумний прохідний перетворювач трансформаторного типу, 3 – пристрій збору інформації, 4 – цифровий інтерфейс, 5 – персональний комп'ютер, 6 – програмне забезпечення.

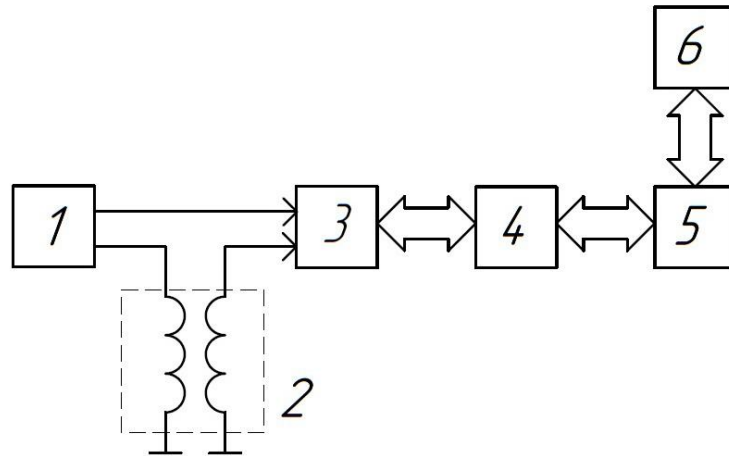


Рис. 4.3. Узагальнена структура апаратно - програмного засобу імпульсного ВСНК з ВСП прохідного типу

Сигнал з імпульсного генератора 1 подається на котушку збудження прохідного трансформаторного ВСП 2, вихідним сигналом якого є сигнал виду $u_{\text{всп}}(t, D, \gamma) = U(t, D, \gamma) \cos \Phi(t, D, \gamma)$, $t \in (t_1, t_2)$, де $U(t, D, \gamma) = U_m e^{-\alpha(t, D, \gamma)t}$, U_m – амплітудне значення сигналу, $\alpha(t, D, \gamma)$ – коефіцієнт загасання сигналу, $\Phi(t, D, \gamma) = 2\pi f(D, \gamma)t$, де, $f(D, \gamma)$ – частота коливань сигналу, t – поточний час, (t_1, t_2) – інтервал часу аналізу сигналу ВСП. Характеристики загасаючого сигналу $u_{\text{всп}}(t, D, \gamma)$ залежать від фізико-механічних параметрів ОК та можливих дефектів у ньому. Далі сигнал $u_{\text{всп}}(t, D, \gamma)$ подається на блок збору інформації 3, який може включати підсилювач, фільтр, аналогово-цифровий перетворювач, до якого додатково передають сигнал з імпульсного генератора 1 для синхронізації роботи блока 3. Отриманий в блоці 3 цифровий сигнал через цифровий інтерфейс 4 передають до персонального комп'ютера 5. Керування роботою блоку збору інформації 3 здійснюється персональним комп'ютером 5 через цифровий інтерфейс 4. Персональний комп'ютер реалізує ДПГ, обчислює дискретні амплітудну та фазову характеристики сигналу ВСП, а також визначає залежність частоти та коефіцієнту загасання цього сигналу, як функції від діаметру ОК та електропровідності матеріалу об'єкту.

Встановлено, що найбільш чутливою до зміни діаметру ОК за імпульсного вихрострумового контролю є фазова характеристика сигналу ВСП, а до електропровідності матеріалу – коефіцієнт загасання амплітудної характеристики.

За фазовою характеристикою визначають частоту внесеного відгуку перетворювача:

$$f(D, \gamma) = \frac{\Delta \hat{\Phi}(t_1, t_2, D, \gamma)}{2\pi \Delta T}, \quad (4.1)$$

де $\Delta \hat{\Phi}(t_1, t_2, D, \gamma)$ – накопичена фаза внесеного сигналу за час $\Delta T = t_2 - t_1$ (рис. 4.4в), а коефіцієнт загасання цього ж сигналу:

$$\alpha(D, \gamma) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1, D, \gamma)}{\hat{U}(t_2, D, \gamma)}, \quad (4.2)$$

де $\hat{U}(t_1, D, \gamma)$, $\hat{U}(t_2, D, \gamma)$ – значення амплітудної характеристики внесеного сигналу відповідно в моменти часу t_1 та t_2 (рис. 4.4г).

На рис. 4.4а зображено графік ділянки збуджуючого сигналу прямокутної форми, рис. 4.4б – сигнал $u_{\text{всп}}(t, D, \gamma)$ ВСП, рис. 4.4в – фазова характеристика $\hat{\Phi}(t, D, \gamma)$ сигналу ВСП, рис. 4.4г – амплітудна характеристика $\hat{U}(t, D, \gamma)$ цього ж сигналу (після згладжування), рис. 4.4д – графік функції $f(D, \gamma)$, рис. 4.4е – графік функції $\alpha(D, \gamma)$, де крива 1 та 2 відповідають алюмінієвим і бронзовим об'єктам, відповідно.

Залежність частоти внесеного сигналу ВСП від діаметру ОК з алюмінію, отриману експериментальним шляхом приведено на рис. 4.4д. Графік функції коефіцієнта загасання $\alpha(D, \gamma)$, також отриманий експериментально, наведено на рис. 4.4е.

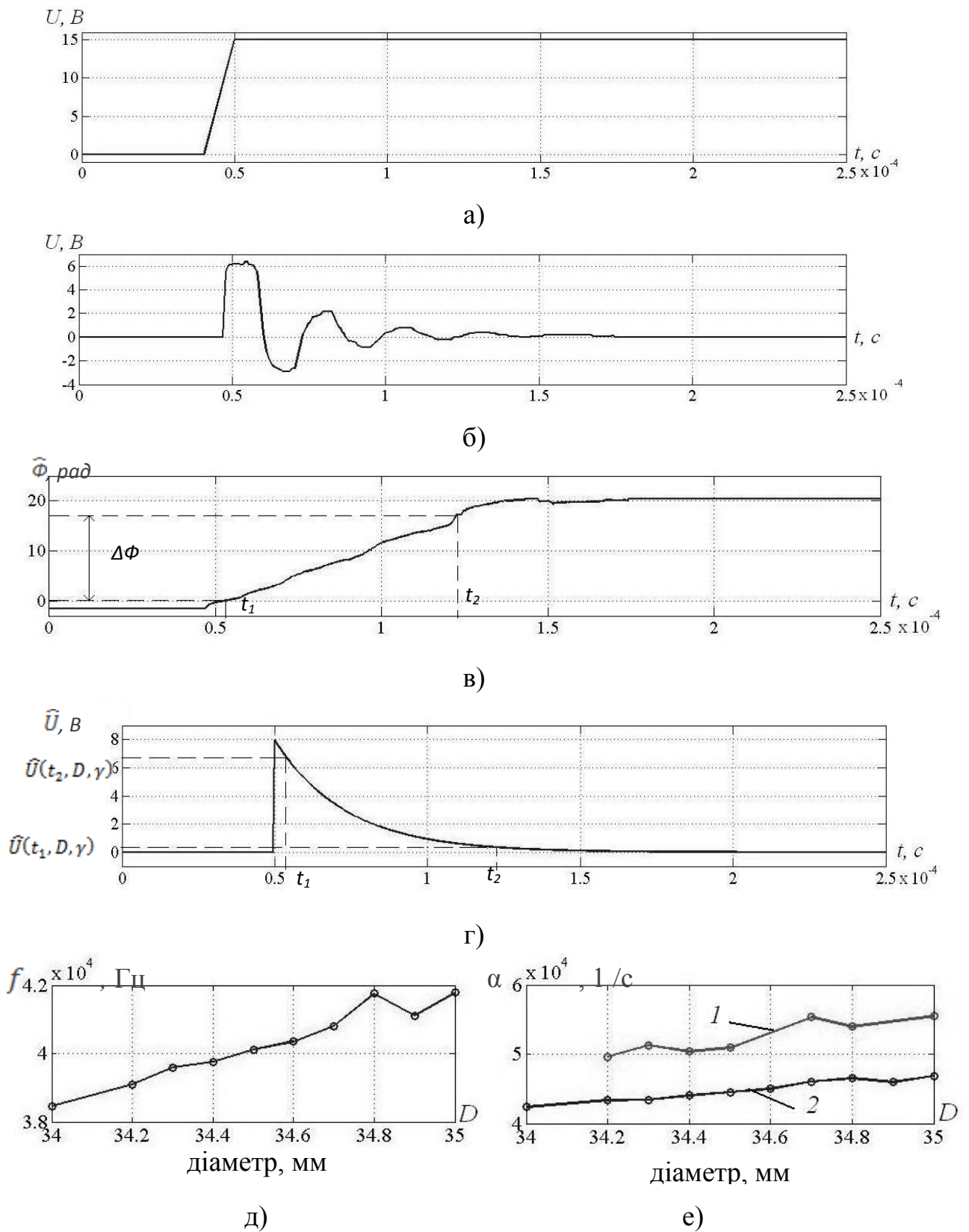


Рис. 4.4. Приклад графіків сигналів ВСП та їх аналізу

З метою підвищення точності визначення частоти та коефіцієнту загасання внесеного відгуку перетворювача за даним способом

запропоновано використовувати апроксимацію амплітудної та фазової характеристик.

Таким чином, розроблений спосіб дозволяє проводити двопараметровий контроль об'єктів циліндричної форми, а саме оцінювати діаметр циліндричних об'єктів та електропровідність матеріалу цього об'єкту в результаті аналізу амплітудної та фазової характеристик внесеного відгуку ВСП. Суттєвим є те, що результати контролю за цим способом не залежать від амплітуди збуджуючого сигналу. З іншої сторони експериментальні дані спотворені дією шумів і завад, що вимагає застосування додаткових заходів для підвищення точності визначення АХС та ФХС.

4.3. Контроль параметрів та характеристик об'єктів циліндричної форми з електропровідних немагнітних матеріалів

В проведених експериментах в якості ОК було використано дві серії циліндричних зразків з алюмінію і бронзи (з питомою електропровідністю відповідно $\gamma_{\text{ал}} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м, $\gamma_{\text{бр}} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м), з різними діаметрами в діапазоні 34 ÷ 35 мм.

На збуджуючу котушку з кількістю витків $W_1 = 176$ трансформаторного прохідного ВСП подавався імпульсний сигнал з генератора, амплітудою 15В, періодом повторення $T_{\Pi} = 10^{-2}$ с, тривалістю $\tau = 10^{-3}$ с. Модель такого сигналу представляється виразом:

$$u(t) = \begin{cases} 15B, & t_1 + kT_{\Pi} < t < t_1 + \tau + kT_{\Pi} \\ 0B, & t_1 + \tau + kT_{\Pi} < t < t_1 + (k+1)T_{\Pi}, k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4.3)$$

Вихідний інформативний сигнал, отриманий з вимірювальної котушки ВСП ($W_2 = 870$), надходив на АЦП для формування вибірки $u[j]$, $j = \overline{1, \dots, 2400}$. Дискретизація виконувалась з періодом $T_{\text{Д}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ с. З АЦП

значення $u[j]$ через ЦІ передавались в персональний комп'ютер для подальшого аналізу.

Фрагмент осцилограми вихідного сигналу ВСП від переднього фронту сигналу збудження (для $k = 0$) представлено на рис. 4.5. З наведеного графіку видно, що цей сигнал, отриманий як реакція системи «ВСП-ОК» на передній фронт імпульсного збуджуючого сигналу, загасає впродовж 4 - 5 періодів власних коливань.

На рис. 4.6 представлено графік отриманої ФХС (крива 1) на прикладі алюмінієвого зразка з діаметром $d = 34$ мм, з якого видно, що ФХС $\hat{\Phi}(t)$ має незначні осциляції в околі лінійної функції часу.

На рис. 4.7 представлений графік залежності частоти сигналу ВСП від діаметра алюмінієвих (крива 1) і бронзових (крива 2) зразків, а також наведено їх лінійні тренди (крива 3 і 4).

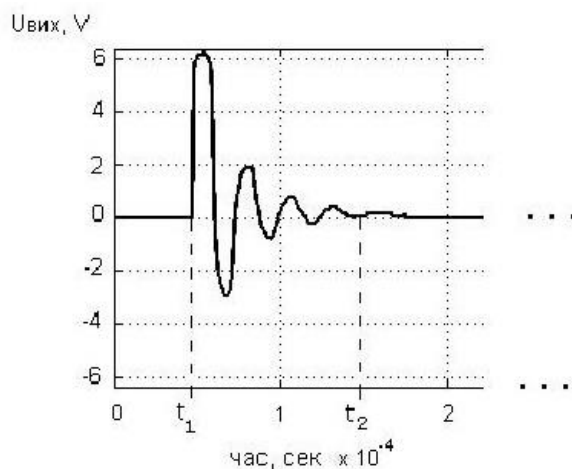


Рис. 4.5. Графік ділянки сигналу ВСП

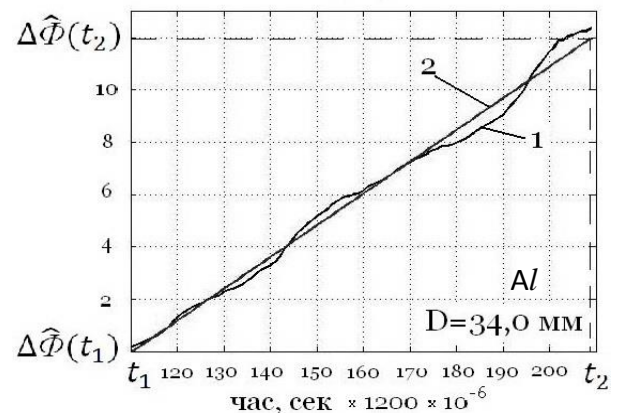


Рис. 4.6. Вид ФХ сигналу ВСП: крива 1 – ФХС для зразка з $d = 34$ мм, крива 2 – її лінійний тренд

Аналіз цих графіків вказує на те, що зміна діаметра зразків призводить до зміни частоти сигналу ВСП, яка має наближений до лінійного характер функціональної залежності $f(d)$. Також лінійна залежність від діаметра

простежується і для коефіцієнта загасання сигналу (рис. 4.8, крива 1 для серії алюмінієвих зразків, крива 2 - для бронзових).

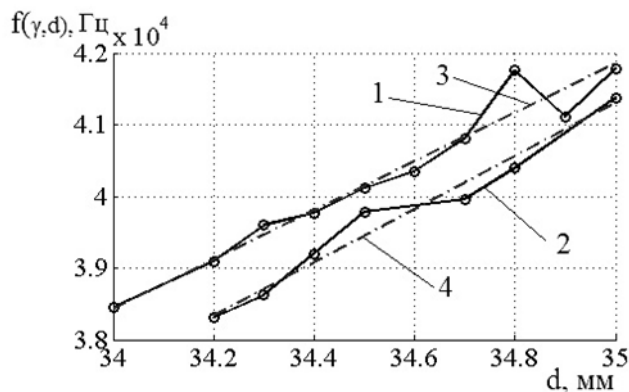


Рис.4.7. Залежності частоти сигналу ВСП від діаметра ОК

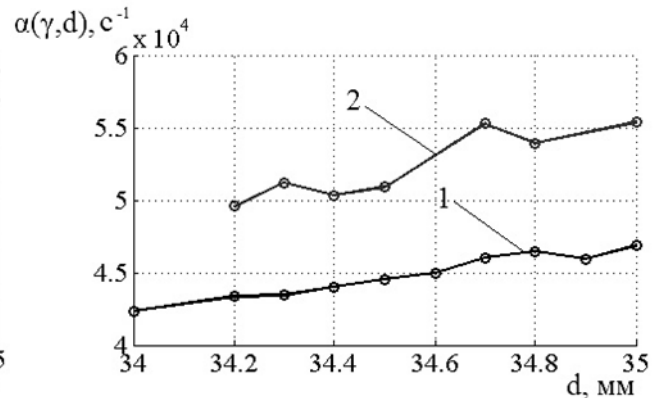


Рис.4.8. Залежності коефіцієнта загасання сигналу ВСП від діаметра ОК

Аналіз графіків на рис.4.8 вказує не тільки на можливість розбраковки заготовок за електропровідністю за зміни їх діаметру в певних межах, але й на можливість оцінювання значень діаметру за умови попереднього калібрування вихрострумової системи контролю з імпульсним збудженням.

4.3. Контроль товщини діелектричного покриття на електропровідній основі

Контроль товщини діелектричного покриття виконувався в два етапи. На першому етапі проведення експериментальних досліджень було проаналізовано вплив характеристик матеріалу ОК без покриття на параметри інформаційного сигналу накладного трансформаторного ВТП, працюючого в імпульсному режимі. В якості ОК використовувались площинні заготовки з алюмінію, бронзи і сталі (питома електропровідність $\gamma_{ал} = 4,87 \cdot 10^7$ См/м, $\gamma_{бр} = 2,75 \cdot 10^7$ См/м, $\gamma_{ст} = 1,45 \cdot 10^6$ См/м) з товщиною, що перевищувала глибину проникнення вихрових струмів. На другому етапі аналізувався вплив різної товщини діелектричного покриття ОК із зазначених матеріалів на

обґрунтовані раніше інформативні параметри інформаційного сигналу ВТП – їх частоту і коефіцієнт загасання.

На первинну котушку ($W_1 = 80$) накладного ВСП надходив збуджуючий імпульсний сигнал від генератора струму (сила струму $I = 5 \text{ мА}$, період повторювання $T_n = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, тривалість $\tau = 62,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Модель цього сигналу дається виразом:

$$i(t) = \begin{cases} 5 \text{ мА}, & t_1 + kT_n < t < t_1 + \tau + kT_n \\ 0 \text{ А}, & t_1 + \tau + kT_n < t < t_1 + T_n(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4.4)$$

Сигнал виміральної котушки ($W_2 = 420$) ВСП підсилювався та оцифровувався АЦП, в результаті чого отримувались вибірки сигналу $u[j]$, $j = \overline{1, \dots, 10000}$. Дискретизація сигналу виконувалася з періодом $T_d = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

Для згладжування фази інформаційного сигналу використано такі вибірки значень сигналу: для заготовок з алюмінію та бронзи – обсягом $j_{\text{ал}} = j_{\text{бр}} = \overline{1500 \dots 6000}$, для заготовок із сталі – $j_{\text{ст}} = \overline{1500 \dots 3501}$. Отримані вибірки згідно методики (п. 3.4) поділялись на три рівні за обсягом групи: $M = M_{\text{ал}} = M_{\text{бр}} = 1500$; $M_{\text{ст}} = 667$, з метою подальшого використання для виділення лінійного тренду фазової характеристики сигналу ВСП. На рис. 4.9 приведено фотографію розробленого лабораторного стенду.

Фрагменти сигналів ВСП отриманих на першому етапі експерименту з імпульсного електромагнітного контролю заготовок з алюмінію, бронзи і сталі без покриттів, наведено на рис. 4.10. Різні значення електропровідності і магнітної проникності матеріалів приводять до зміни частоти і загасання сигналу ВСП.

На рис. 4.11 зображено фрагменти сигналів у випадку контролю заготовки зі сталі з різною товщиною діелектричного покриття. Крива 1 відповідає фрагменту сигналу ВСП в задачі контролю заготовки без покриття, крива 2 – з покриттям $h = 1,62 \text{ мм}$, крива 3 – $h = 4,90 \text{ мм}$. Як видно

з рис. 4.11, зі збільшенням h вплив вихрових струмів ОК на інформаційний сигнал ВСП зменшується. В цьому разі амплітудне значення сигналу збільшується, а частота їх коливань лишається незмінною.

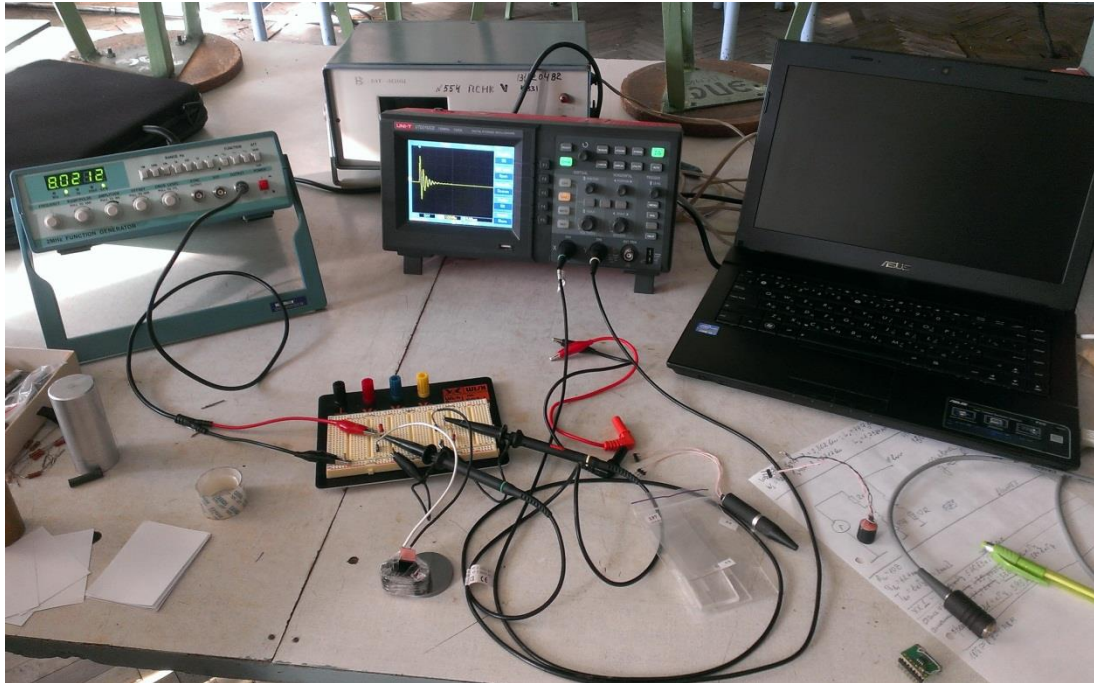


Рис. 4.9. Лабораторний стенд системи імпульсного вихрострумового контролю

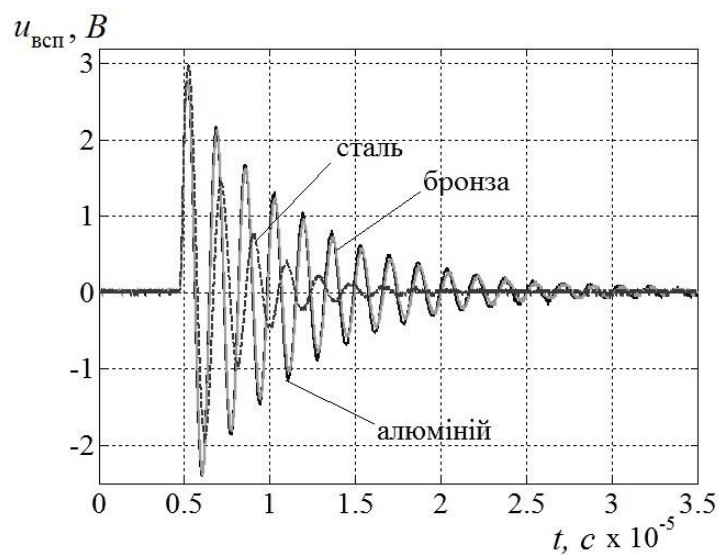


Рис. 4.10. Графік ділянки сигналів ВСП для різних матеріалів ОК

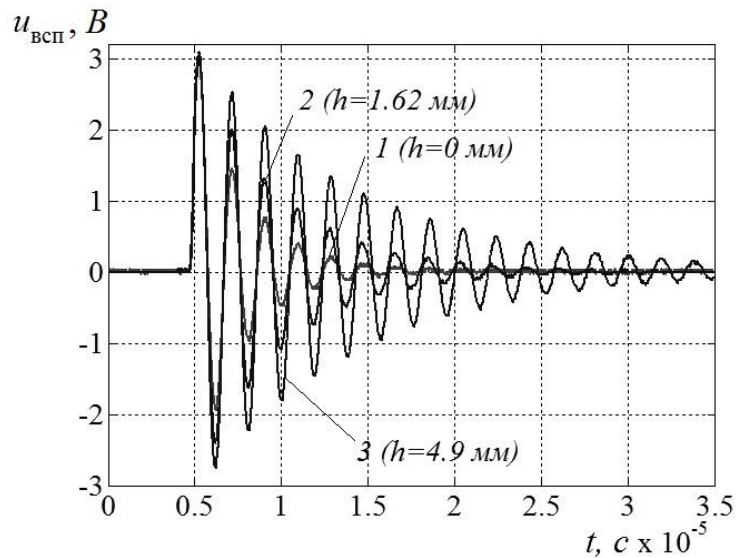


Рис. 4.11. Залежність амплітуди сигналів ВСП від товщини покриття

На рис. 4.12 наведено графіки отриманих залежностей $\alpha(h)$, які вказують на збільшення значення коефіцієнта загасання сигналу ВСП у випадку зменшення h . З порівняльного аналізу кривих на рис. 4.12 можна зробити висновок про те, що функціональна залежність $\alpha(h)$ на будь-якій основі (магнітній чи немагнітній) має експоненціальний характер. Також можна

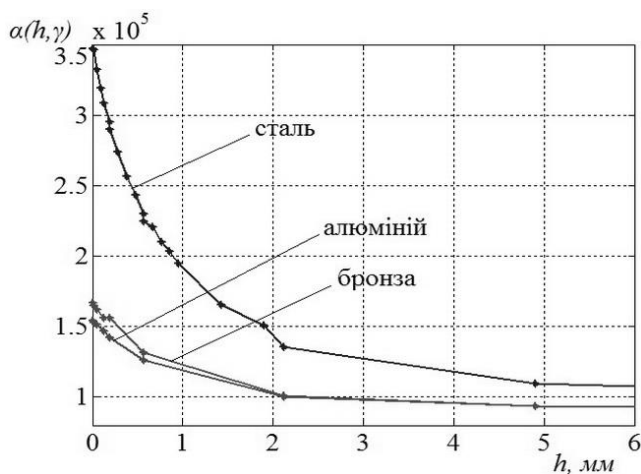


Рис. 4.12. Залежності коефіцієнтів загасання сигналів ВСП від товщини покриття для різних матеріалів ОК

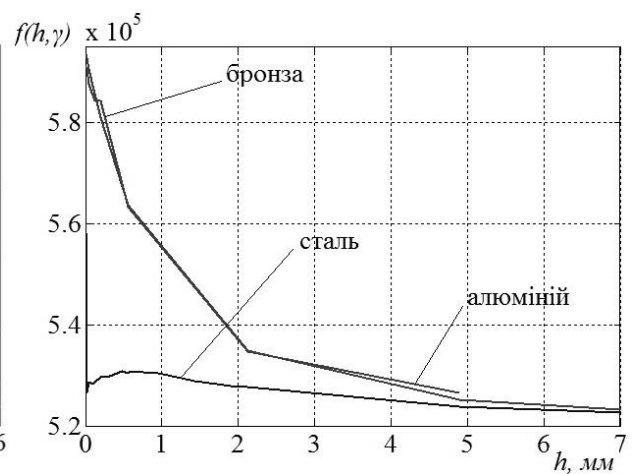


Рис. 4.13. Залежності частоти сигналів ВСП від товщини покриття для різних матеріалів ОК

зробити висновок, що характеристики матеріалу основи заготовок впливають на значення крутості одержаних кривих. Незначне відхилення результату від експоненціальної залежності може бути наслідком наявних прихованих дефектів в контрольованому зразку, зміни характеристик заготовок або похибок вимірювання товщини покриття чи коефіцієнта загасання сигналу.

Результати визначення частоти сигналів ВСП як функції товщини діелектричного покриття приведені на рис. 4.13. Залежність $f(h)$ дає однозначний результат тільки для немагнітних матеріалів (див. криві для бронзи та алюмінію). В цьому випадку чутливість до товщини покриття збільшується зі зменшенням її величини.

4.4. Імпульсна вихрострумова дефектоскопія виробів із застосуванням мультидиференціального вихрострумового перетворювача

В проведених експериментах в якості ОК використовувався зразок з алюмінієвого сплаву АД31Е5 з тріщинами розкриттям 1мм та глибиною $\delta = 0.1 \div 3.0$ мм (рис. 4.14). Аналізувався вплив зміни глибини тріщини в ОК на частоту і амплітуду інформаційного сигналу мультидиференціального ВСП [8], який був розроблений і переданий для проведення досліджень д.т.н. В.М. Учаніним (рис.4.15). Для оцінювання частоти f сигналу було використано вибірку значень ФХС обсягом $j = \overline{1500 \dots 4999}$. Фото лабораторного стенду приведено на рис. 4.16. Результати визначення залежності $f(\delta)$ приведено на рис. 4.17.

З аналізу графіку видно, що характер залежності частоти сигналів ВСП від глибини тріщини δ наближається до експоненціального. Ділянка кривої,

що відповідає невеликим значенням глибин тріщин має незначні відхилення від лінії тренду, що відповідає відносній похибці в 0,2% ($\pm 0,4\text{мкм}$).

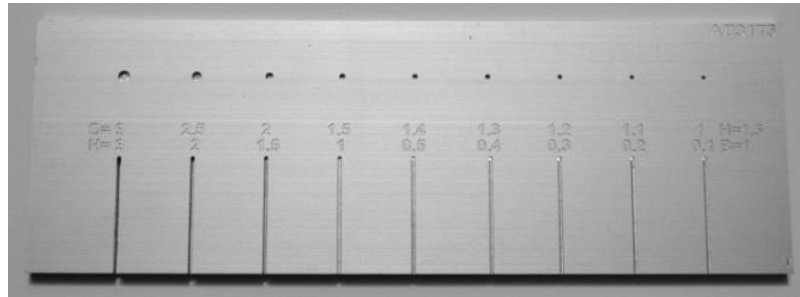


Рис. 4.14. Об'єкт дослідження

На рис. 4.18 наведено залежність максимального значення амплітуди сигналу мультидиференціального ВСП від глибини тріщини. Дана залежність задовільно інтерполюється наведеним на рисунку поліномом 3-го ступеня – похибки інтерполяції не перевищують 0,85 мВ (при відносній похибці 1,5%). Отримані в такий спосіб залежності можуть бути використані для кількісного оцінювання параметрів тріщин.

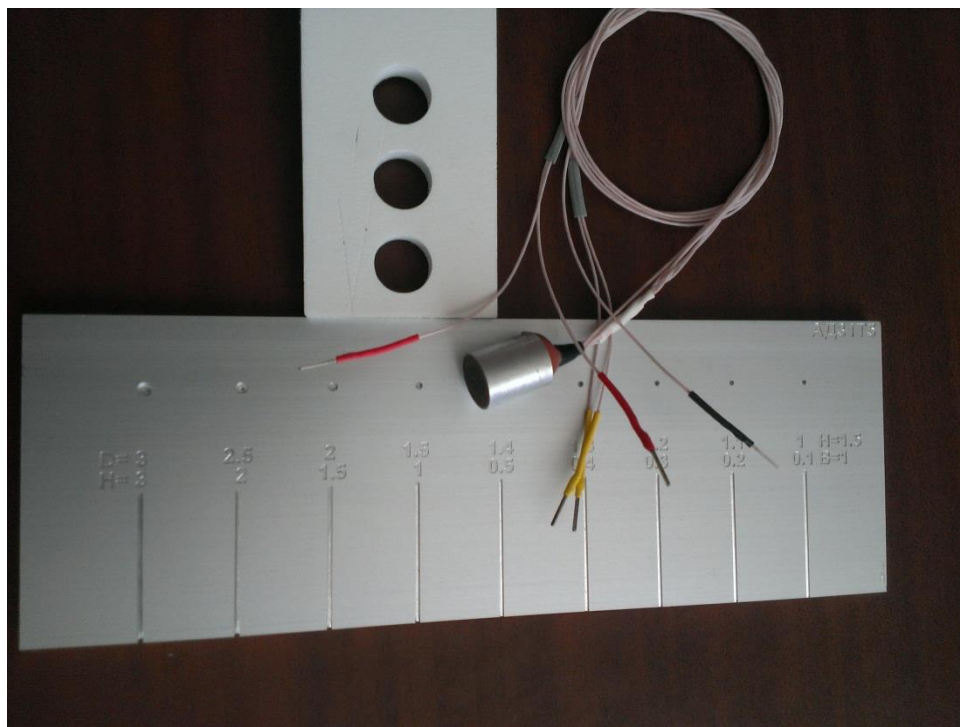


Рис. 4.15. Мультидиференційний ВСП та досліджуваний зразок

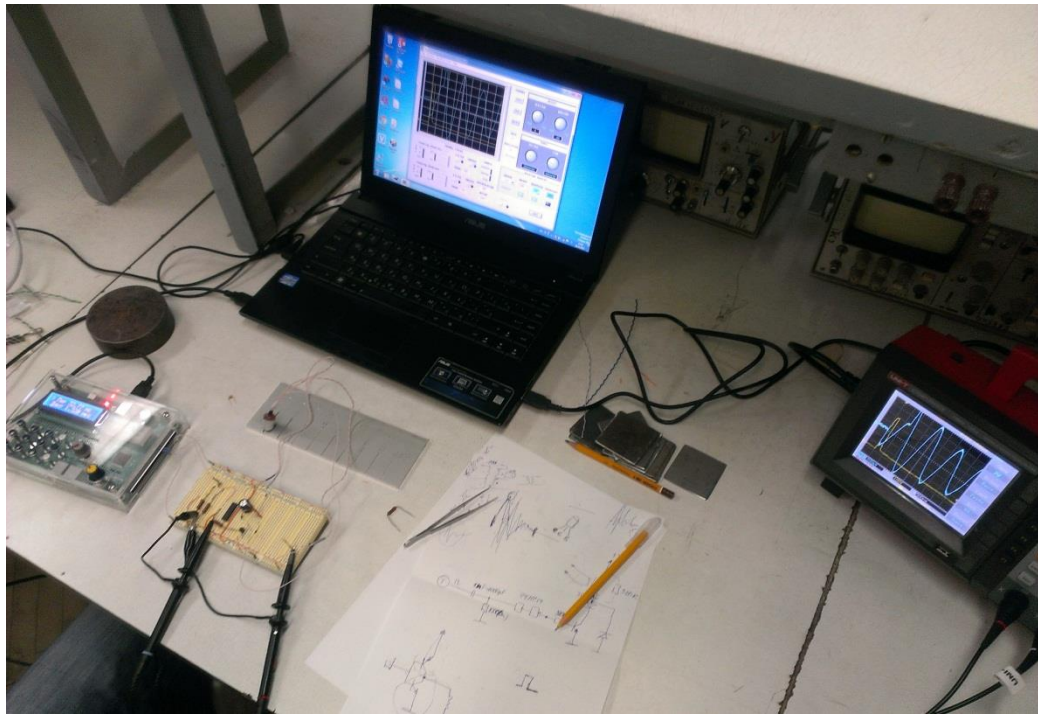


Рис. 4.16. Експериментальний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК

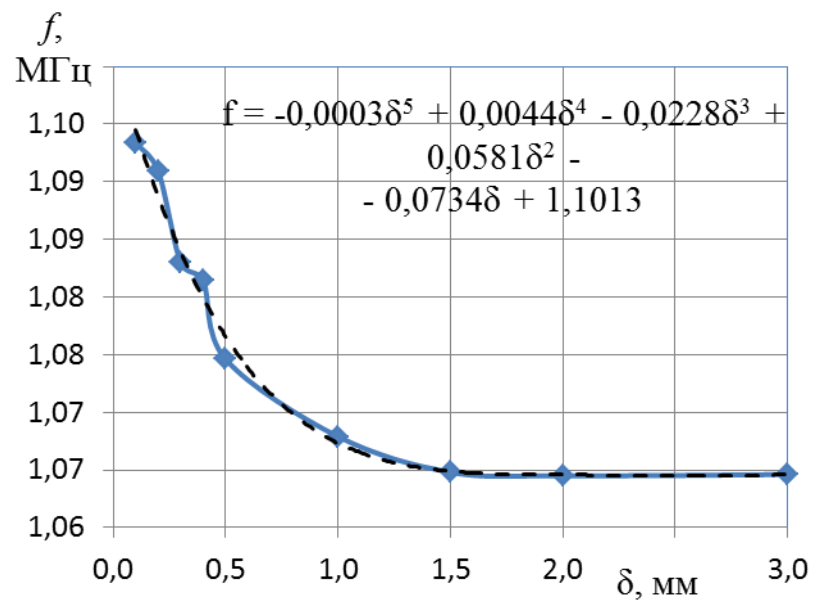


Рис. 4.17. Залежність частоти сигналів ВСП від глибини тріщини

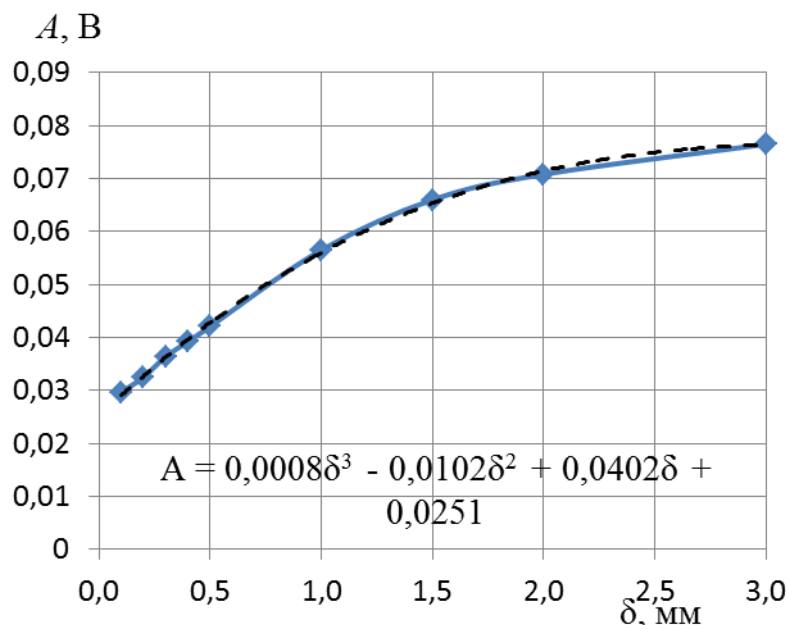


Рис. 4.18. Залежність максимального значення амплітуди сигналів ВСП від глибини тріщини

Залежності наведеного на рис. 4.17 та 4.18 виду, за умови виконання калібрування системи на контрольних зразках, можуть бути використані для кількісного оцінювання параметрів тріщин.

Крім того, для порівняння імпульсного та неперервного режимів збудження ВСП, на вищезазначеному зразку (рис. 4.14) проведено дослідження зміни амплітуди сигналу мультидиференційного ВСП з неперервним збудженням. Порівняльний графік відносної чутливості по амплітуді сигналів ВСП в двох режимах роботи приведено на рис. 4.19.

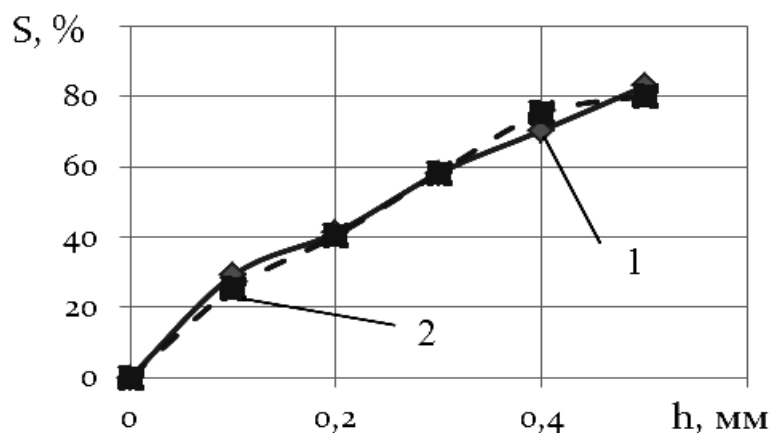


Рис. 4.19. Порівняльний графік відносної чутливості по амплітуді сигналів ВСП з неперервним (1) та імпульсним (2) збудженням

Встановлено, що максимальна різниця чутливості не перевищує 5%, що підтверджує можливість використання одних і тих перетворювачів в обох випадках.

З метою дослідження роботи мультидиференційного ВСП з імпульсним збудженням в динамічному режимі роботи, було проведено аналіз сигналів такого ВСП в режимі сканування ОК. Сигнали ВСП отримувались з кроком 1 мм. В сигналах ВСП виділялись максимальні пікові значення амплітуди. Розподіл пікових значень напруги у прив'язці до координат на поверхні ОК представлено на рис. 4.20б. З аналізу цього розподілу видно, що наявність тріщини в ОК призводить до істотного збільшення амплітуди напруги ближче до країв тріщини і зменшення в центральній частині тріщини. На рис. 4.21 подано розподіл пікових значення амплітуди сигналів ВСП по поверхні ОК в координатах (7; 166) мм з метою уникнення впливу крайових ефектів на границях об'єкту.

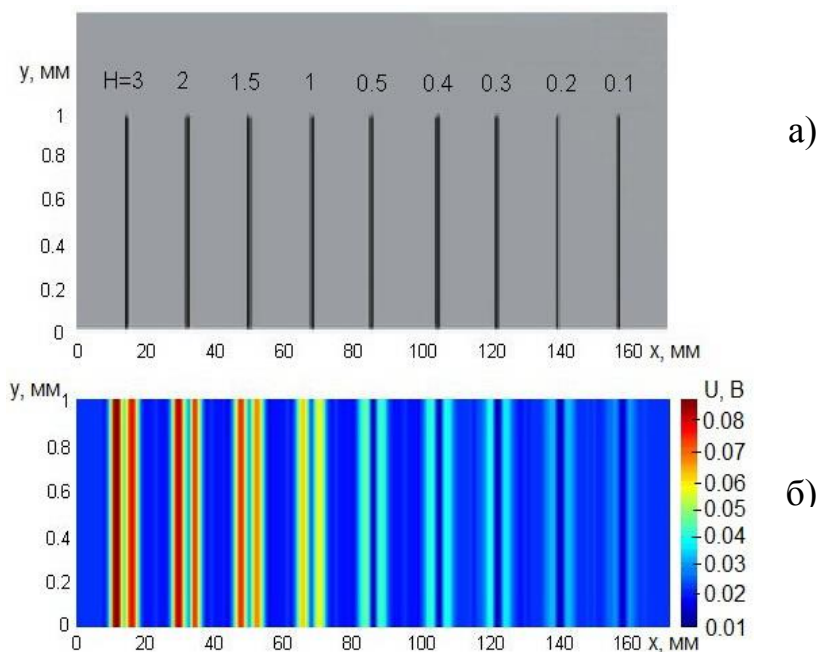


Рис. 4.20. ОК (а) та графік розподілу на його поверхні (за кольором) пікових значень напруги ВСП (б)

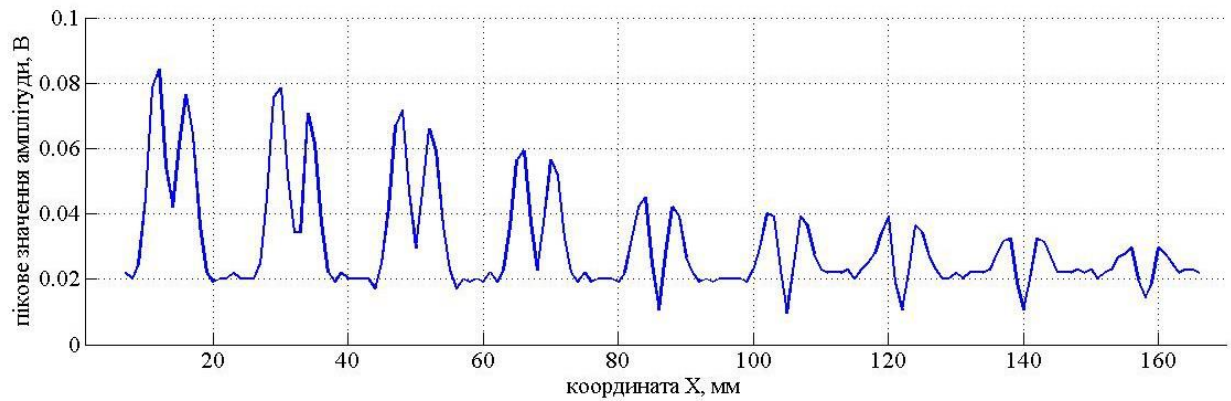


Рис. 4.21. Розподіл пікових значень напруги ВСП вздовж ОК

Розподіл пікових значень амплітуди та частоти власних коливань сигналу ВСП в околі координат тріщини глибиною $\delta = 3 \text{ мм}$ ($x = 14 \text{ мм}$) проілюстровано у збільшеному масштабі на рис. 4.22а та 4.22б. З графіків видно, що в місцях розташування тріщин спостерігається зміна розподілу параметрів сигналу: зменшення значень миттєвої частоти коливань сигналів в околі тріщини та збільшення безпосередньо над нею.

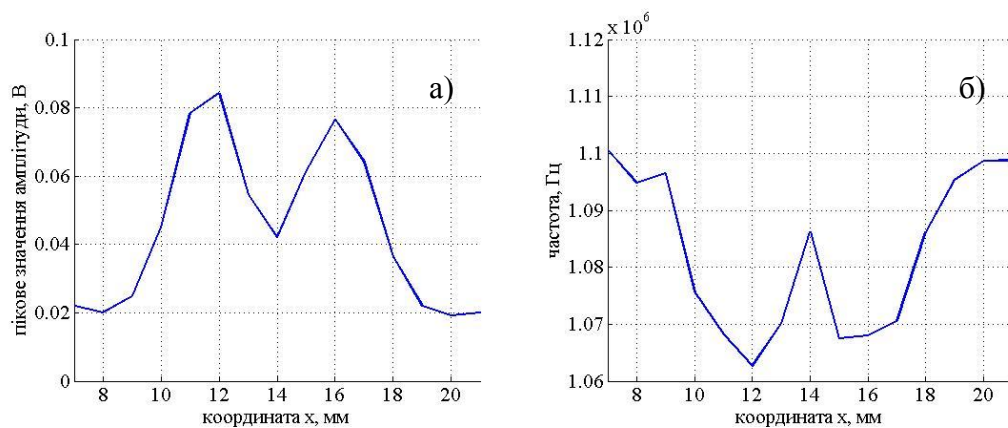


Рис. 4.22. Залежність амплітуди (а) та частоти (б) сигналів ВСП від координати x для $\delta = 3 \text{ мм}$

Для підвищення точності локалізації місця розташування дефекта і підвищення вірогідності виявлення тріщини можна рекомендувати розмірний показник: $\Pi = \frac{f}{A}$ (Гц/В), де f – значення власної частоти сигналу ВСП, A – пікове значення амплітуди.

Додатково були проведені експериментальні дослідження контролю стандартних зразків ВСО-1 та ВСО-2 мультидиференціальним ВСП з імпульсним збудженням. Зразки мали вигляд пластин товщиною 5 мм, довжиною 100 мм, шириною 30 мм (рис. 4.23), ВСО-1 зі сталі марки Ст.20, а ВСО-2 – з алюмінієвого сплаву Д16. На одній з поверхонь обох зразків з рівним інтервалом методом фрезерування нанесено три штучні дефекти, що імітують поверхневі тріщини, шириною 0.2 мм та глибиною $\delta = \{0.2, 0.5, 1.0\}$ мм. Шорсткість робочої поверхні не перевищувала 1,6 мкм.

Поставлена задача вирішувалася шляхом експериментів, що базуються на:

- дослідженні роботи мультидиференційного накладного ВСП за умови імпульсного збудження та подальшому аналізі його сигналів у часовій області;
- виявленні і аналізі інформативних параметрів сигналів ВТП;
- визначенні функціональної залежності параметрів інформаційного сигналу ВСП від характеристик дефектів ОК.

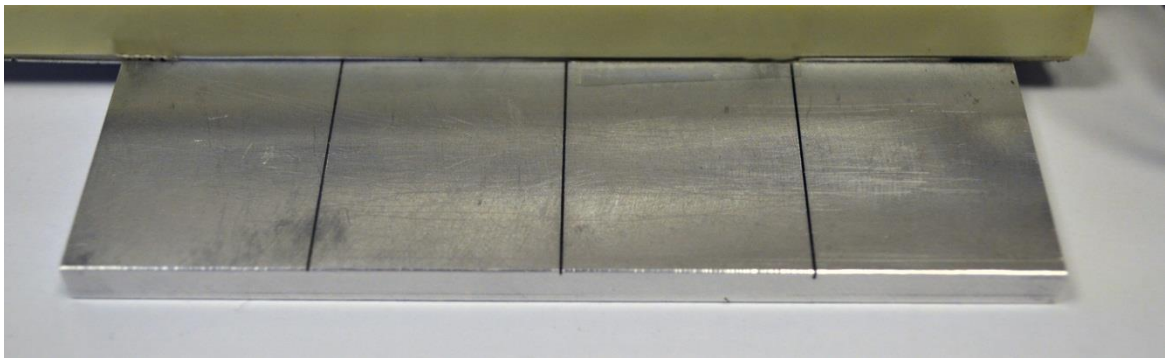


Рис. 4.23. Об'єкт дослідження

Сигнал ВСП (рис. 4.24) мав вигляд загасаючих гармонічних коливань. Модель цього сигналу представлялася у вигляді адитивної суміші загасаючих гармонічних коливань та гауссового шуму:

$$u_{ecn}(t, \delta) = A_m(\delta) \cdot e^{-\alpha(\delta) \cdot t} \cos(2\pi f(\delta) \cdot t) + u_{ui}(t), \quad t \in (t_1, t_2) \quad (4.5)$$

де $A_m(\delta)$ – амплітудне значення інформаційної складової сигналу ВСП, $\alpha(\delta)$ – коефіцієнт загасання сигналу, $f(\delta)$ – частота власних коливань сигналу, t – поточний час, (t_1, t_2) – інтервал часу аналізу сигналу ВСП, $t \in (t_1, t_2)$, $u_w(t)$ – шумова складова сигналу, що розглядалась як реалізація гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 .

Порядок обробки та аналізу характеристик інформаційних сигналів ВСП полягав у:

- дослідженні роботи мультидиференціального ВСП в умовах імпульсного збудження згідно запропонованої в [119, 120] та п. 3.4 методики;
- визначенні частоти власних коливань інформаційного сигналу ВСП за формулою:

$$f(\delta) = \frac{\Delta\Phi(\delta)}{2\pi\Delta T} \quad (4.6)$$

де $\Delta\Phi(\delta)$ – накопичена за час $\Delta T > T$, T – період сигналу ВСП, фаза сигналу ВСП;

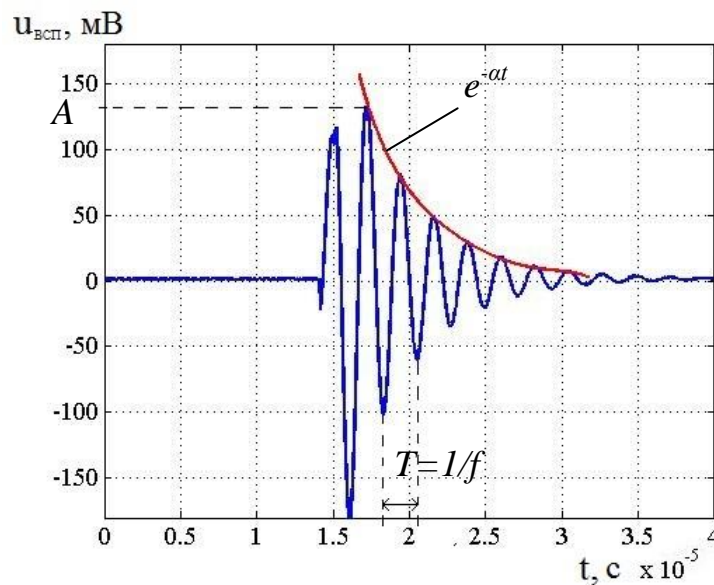


Рис. 4.24. Графік ділянки сигналу ВСП з імпульсним збудженням

- дослідженні роботи мультидиференціального ВСП в умовах неперервного збудження на частоті власних коливань;
- аналізі інформативних параметрів отриманих сигналів ВСП – залежності амплітуди $A(\delta)$ сигналів, коефіцієнту загасання $\alpha(\delta)$ і частоти власних коливань $f(\delta)$ від δ .
- оцінюванні чутливості інформативних параметрів сигналів ВСП до зміни δ в ОК. Під чутливістю до інформативних параметрів розуміються $S_A = \partial A / \partial \delta$, $S_\alpha = \partial \alpha / \partial \delta$, $S_f = \partial f / \partial \delta$.

Така методика дозволяє виконати коректний співставний аналіз чутливостей мультидиференціального ВСП в різних режимах збудження до такого параметру ОК як глибина тріщини.

Вихрострумовий перетворювач встановлювався послідовно на ділянку ОК з певною тріщиною і отримувались сигнали ВСП виду (4.5). Дослідження проведені для двох режимів збудження – імпульсного та неперервного для зразків ВСО-1 та ВСО-2. На етапі аналізу сигналів ВСП для отриманих вибірок визначались залежності $A(\delta)$, $\alpha(\delta)$ та $f(\delta)$.

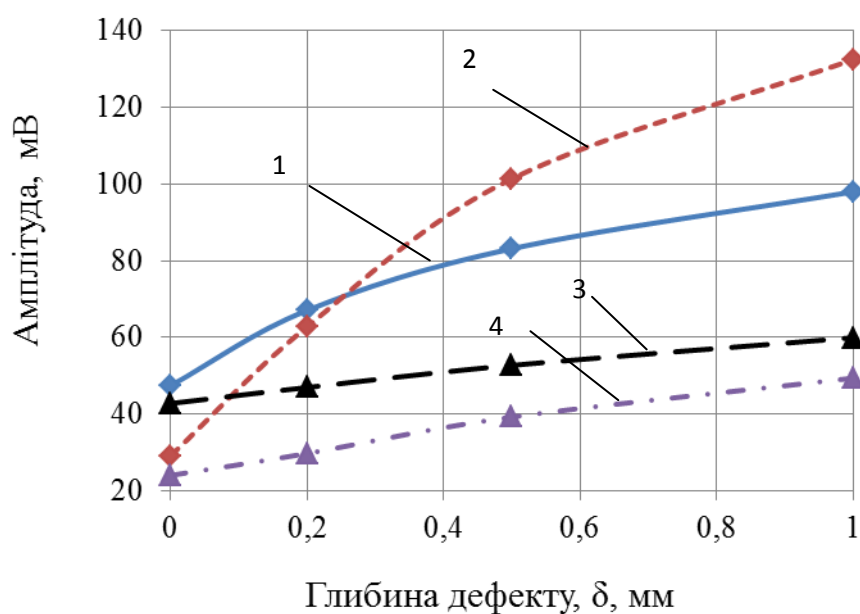
Експериментальні значення $A(\delta)$ для сигналу мультидиференціального ВСП в умовах імпульсного та неперервного збудження для вказаних вище зразків представлені на рис. 4.25 та рис. 4.26. Криві 1 та 2 на рис. 4.25 та рис. 4.26 відповідають залежності $A(\delta)$ для зразка ВСО-1 на частотах 667 кГц та 434 кГц, відповідно; криві 3 та 4 – залежності $A(\delta)$ для зразка ВСО-2 на частотах 787 кГц та 507 кГц, відповідно. З аналізу цих графіків видно, що збільшення глибини тріщини в ОК призводить до збільшення значень амплітуди напруги ВСП. Чутливість амплітуди сигналу перетворювача до глибини тріщини в ОК приведена в таблиці 4.2.

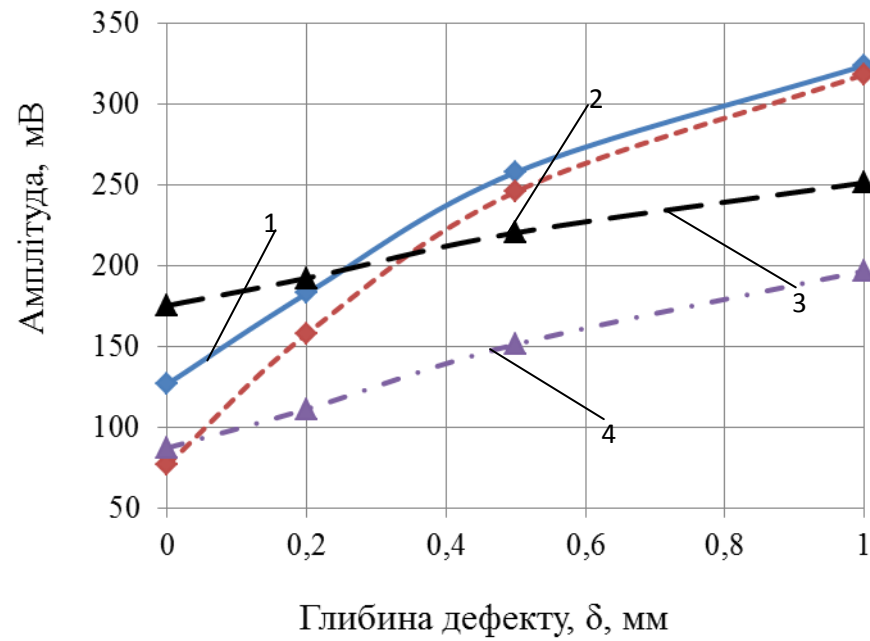
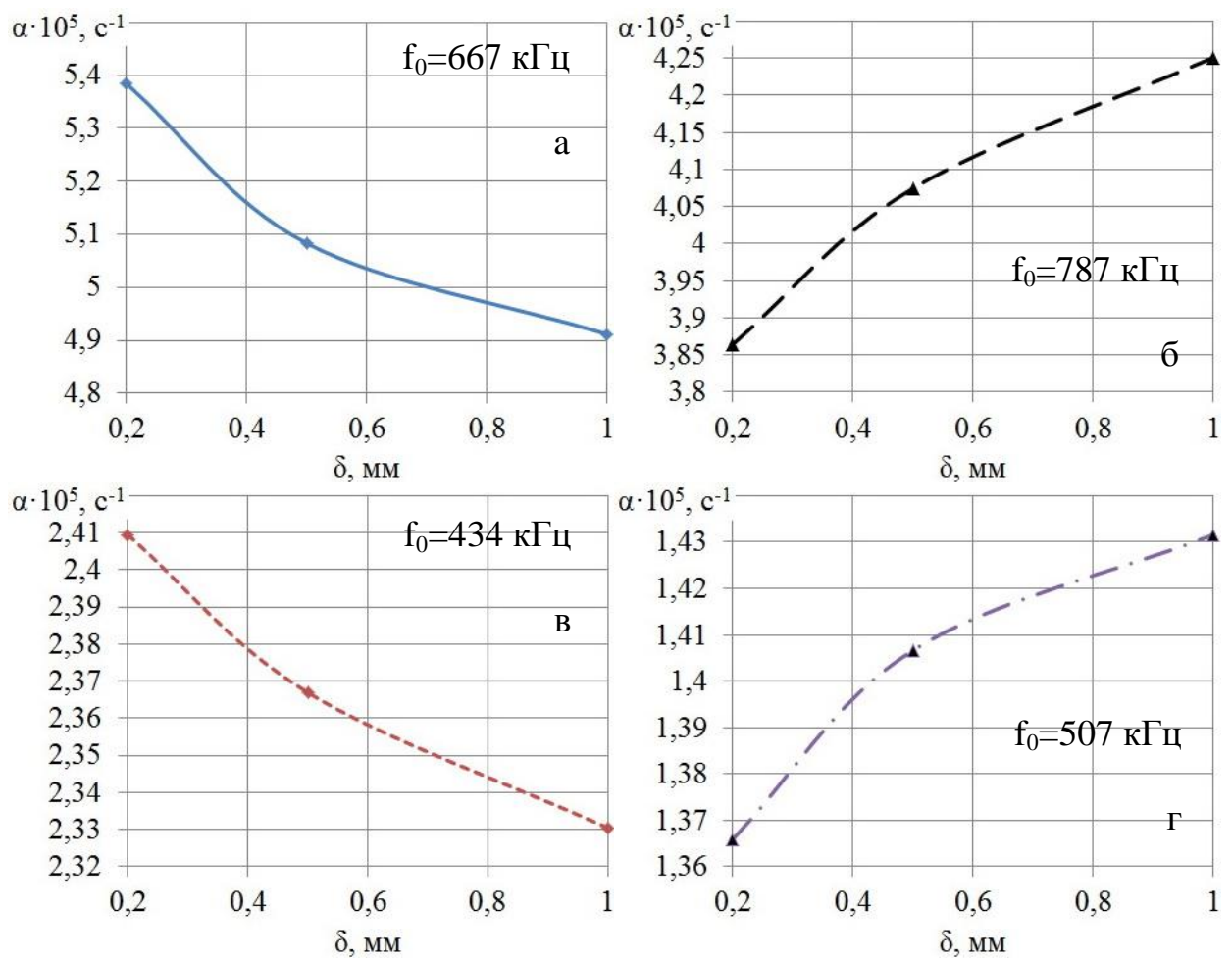
З графіків рис. 4.25 та рис. 4.26 видно, що залежність зміни амплітуди сигналу ВСП наближена до лінійної, проте чутливість за неперервного збудження ВСП є більшою.

Таблиця 4.2. Чутливість до глибини тріщин, мВ/мм

Збудження	Зразок 1		Зразок 2	
	667 кГц	434 кГц	787 кГц	507 кГц
імпульсне	29,8	62,3	14,5	20,4
гармонічне	132	145	62	91

На рис. 4.27 приведені результати аналізу загасання сигналу ВСП при його імпульсному збудженні для двох зразків на різних частотах: рис. 4.27а та рис. 4.27в для ВСО-1, рис. 4.27б та рис. 4.27г для ВСО-2. З графіків видно, що збільшення частоти власних коливань сигналу ВСП дає змогу підвищити чутливість до глибини тріщини, а саме – для зразка ВСО-1 чутливість $S_a(f=667\text{кГц})=34\cdot 10^3$ Гц/мм та $S_a(f=434\text{кГц})=7\cdot 10^3$ Гц/мм. Крім того співставний аналіз цих графіків показує, що для ОК з різних матеріалів спостерігається різна залежність коефіцієнта загасання від глибини тріщини, що може бути використано для оцінювання фізико-механічних параметрів матеріалу ОК.

Рис. 4.25. Залежність $A(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

Рис. 4.26. Залежність $A(\delta)$ за неперервного збудження ВСПРис. 4.27. Залежність $\alpha(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

Результати визначення зміни частоти власних коливань сигналу ВСП з імпульсним збудженням як функції від глибини тріщини в ОК приведені на рис. 4.28. Зразку ВСО-1 відповідають графіки залежності $f(\delta)$ у випадку, коли початкова частота власних коливань сигналу ВСП дорівнює 667 кГц та 434 кГц на рис. 4.28а та рис. 4.28в, відповідно. Зразку ВСО-2 – рис. 4.28б для частоти 787 кГц та рис. 4.28г – 507кГц. З аналізу цих графіків видно, що залежність $f(h)$ наближена до лінійної та має тенденцію до зменшення в результаті збільшення глибини тріщини h . В цьому випадку чутливість до глибини тріщини h покращується зі збільшенням частоти сигналу ВСП: для зразка ВСО-2 чутливість $S_f(f=787\text{кГц})=83,6 \text{ Гц/мм}$ та $S_f(f=507\text{кГц})=28,8 \text{ Гц/мм}$.

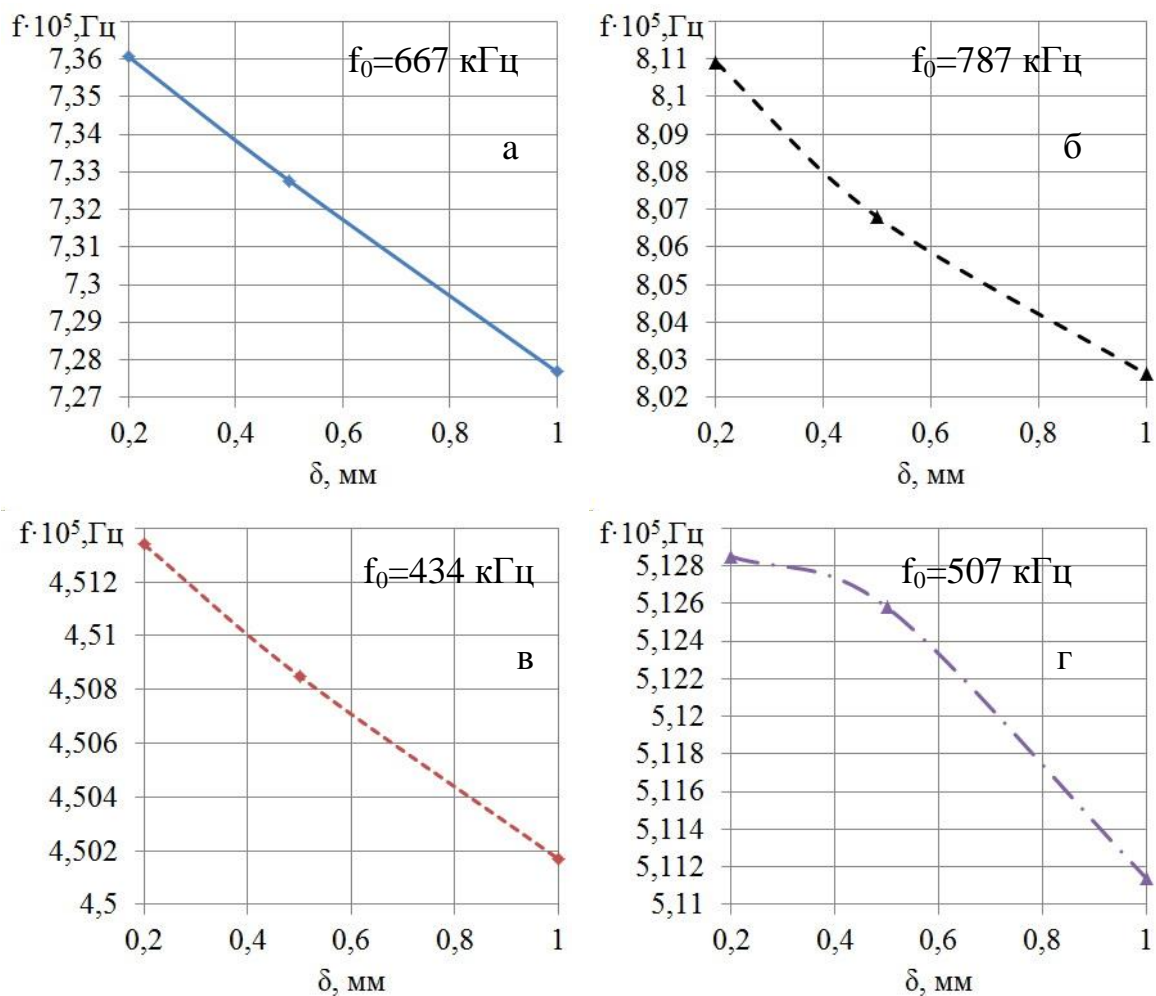


Рис. 4.28. Залежність $f(\delta)$ за імпульсного збудження ВСП

Порівняння імпульсного та гармонічного режимів збудження мультидиференціального ВСП шляхом оцінювання зміни амплітудних

значень сигналів ВСП від глибини тріщини в ОК показало, що чутливість за неперервного збудження ВСП є кращою, проте використання залежності амплітуди сигналів ВСП з імпульсним збудженням від глибини тріщини в ОК дозволяє в деяких випадках розширити функціональні можливості дефектоскопії. Крім того, спостерігається збільшення чутливості таких інформативних параметрів ВСП, як коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу перетворювача до глибини тріщини ОК із збільшенням початкової частоти сигналу ВСП (згідно порядку оброблення та аналізу експериментальних даних, власної частоти сигналу ВСП з імпульсним збудженням на бездефектній ділянці ОК).

Висновки до розділу 4

1. Проведено модельні дослідження фізичних процесів в системі «параметричний ВСП – ОК» з метою пошуку інформативних параметрів сигналу ВСП узгоджених з режимом роботи і параметрами електричної схеми зазначеної системи, які довели можливість використання нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів перетворювача – коефіцієнта загасання, частоти власних коливань та початкової фази у випадку виникнення в ланцюгах ВСП загасаючих гармонічних коливань в імпульсному режимі роботи.

2. Створено дослідний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК, на базі якого проведено експериментальне дослідження запропонованого методу імпульсного ІВСНК на серіях зразків (пласкої та циліндричної форми), що підтвердило можливість використання нових параметрів сигналів ВСП – власної частоти та коефіцієнта загасання сигналу в задачах ВСНК. Зокрема, для циліндричних зразків похибка визначення діаметру становить 0,3%, глибини поверхневих тріщин - 0,2%.

3. В процесі реалізації аналізу сигналів ІВСНК в часовій області на прикладі визначення діаметру та електропровідності циліндричних ОК встановлено, що під час контролю таких зразків з електропровідного матеріалу в імпульсному режимі частота інформаційного сигналу прохідного трансформаторного ВСП залежить лінійно від діаметра ОК і практично не залежить від електропровідності матеріалу ОК. Абсолютна похибка визначення діаметру ОК запропонованим способом не перевищувала 0,1 мм, що відповідає відносній похибці – 0,3%. Під час оцінки коефіцієнта загасання сигналу ВСП виявлено, що існує суттєва різниця його значень для різних матеріалів ОК, що свідчить про залежність коефіцієнта загасання сигналу перетворювача від електропровідності матеріалу ОК. Це дозволяє застосовувати декремент як інформативний параметр для сортування зразків за їх електропровідностями.

4. Експериментально встановлено, що при контролі товщини діелектричного покриття заготовок з різних матеріалів в імпульсному режимі, коефіцієнт загасання інформаційного сигналу перетворювача залежить від товщини покриття і магнітної проникності матеріалу заготовок. Ця залежність має експоненціальний характер. Абсолютна похибка визначення товщини покриття на сталевій заготовці за коефіцієнтом загасання запропонованим способом не перевищувала 0,005 мм, на алюмінієвій та броневій – 0,004 мм. Встановлено загальний характер залежності частоти коливань інформаційного сигналу від товщини покриття заготовок, в результаті чого абсолютна похибка визначення товщини покриття на алюмінієвій та бронзовій заготовках не перевищувала 0,03 мм.

5. Досліджено роботу мультидиференціального ВСП в імпульсному та гармонічному режимах збудження та проаналізовано інформаційні сигнали згідно запропонованої методики аналізу і представлення інформації шляхом порівняння двох режимів збудження. Експериментально встановлено, що в процесі контролю тріщин в алюмінієвому зразку, відносна

похибка визначення розміру тріщини за частотою інформаційного сигналу ВСП не перевищує 0,2%, за амплітудою – 1,5%.

6. В процесі порівняння імпульсного та гармонічного режиму роботи мультидиференціального ВСП виявлено, що максимальна різниця чутливості по амплітуді не перевищує 5%, що підтверджує можливість використання тих самих типів перетворювачів в обох режимах збудження.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну задачу удосконалення імпульсного методу ВСНК за рахунок використання нових для ВСНК інформативних параметрів сигналів ВСП та розроблення інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК. Отримано такі основні результати:

1. Аналіз сучасних методу та засобів ВСНК з імпульсним збудженням показав, що метод має ряд переваг, зокрема проведення аналізу сигналу ВСП в часовій області з оцінкою відповідних інформативних параметрів, можливість зміни потужності сигналу для покращення рівня сигнал/шум та збільшення глибини проникнення. Встановлено, що на сьогодні як інформативні параметри ІВСНК найчастіше використовуються характерні точки сигналів ВСП, які є нестійкими до впливу шумів і завад. Показана можливість удосконалення ІВСНК за рахунок формування сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань і використання їх параметрів, що потребує подальшого розвитку теоретичного базису ІВСНК.

2. Удосконалено фізико-математичну модель системи ВСП-ОК за рахунок врахування додаткових ємності та опору в еквівалентній семі ВСП, що є необхідним для адекватного представлення процесів формування сигналів ВСП у вигляді загасаючих гармонічних коливань, що дозволило:

- вперше запропонувати та обґрунтувати використання власної частоти і коефіцієнта загасання сигналів ВСП в якості нових інформативних параметрів;

- визначати зв'язок параметрів сигналів ВСП у формі загасаючих гармонічних коливань з параметрами ОК.

3. Розроблено метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів імпульсного ВСНК, який поєднує дискретне перетворення Гільберта та використання лінійного тренду фазової та експоненційної апроксимації амплітудної характеристик сигналу ВСП, що дозволило підвищити точність оцінювання параметрів і характеристик ОК через підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП.

4. Проаналізовано похибки визначення коефіцієнта загасання та частоти власних коливань сигналу ВСП за їх амплітудною та фазовою характеристиками, на основі чого запропоновано та обґрунтовано критерій вибору часового інтервалу аналізу сигналів ВСП для мінімізації цих похибок шляхом коригування часового інтервалу аналізу характеристик сигналів ВСП.

5. Проведено моделювання запропонованого методу аналізу сигналів ВСП в умовах імпульсного збудження, за результатами якого:

- розроблено алгоритмічне забезпечення, що реалізує запропонований метод визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів ВСНК, їх подальше оцінювання та статистичний аналіз, який дозволяє виявляти модуляції характеристик сигналів ВСП, викликані дефектами ОК під час його сканування;

- підтверджено ефективність використання методів апроксимації характеристик сигналу ВСП, що забезпечило підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів ВСП за їх амплітудною та фазовою характеристиками у 8 та 3 рази, відповідно.

6. Розроблено дослідний зразок інформаційно-діагностичної системи імпульсного ВСНК, на базі якого проведено експериментальне дослідження запропонованого методу імпульсного ІВСНК на серіях зразків (пласкої та циліндричної форми). Експериментальні результати підтвердили теоретичні та підтвердили можливість використання нових параметрів сигналів ВСП – власної частоти та коефіцієнта загасання сигналу. Встановлено функціональні зв'язки запропонованих параметрів сигналів з параметрами і

характеристиками ОК в різних задачах ІВСНК: контролю електропровідності матеріалів, діаметру прутків, товщини діелектричного покриття, глибини залягання дефектів, геометричних параметрів ОК. Зокрема, для циліндричних зразків похибка визначення діаметру становить 0,3%, глибини поверхневих тріщин – 0,2%.

7. Основні теоретичні та експериментальні дослідження інформаційно-діагностичної системи імпульсного вихрострумowego контролю впроваджені у виробничий процес ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» (м. Луцьк), а також використані у навчальному процесі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського під час викладання дисциплін «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / под. ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 445с.
2. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия. / А.Л Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с., ил.
3. Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
4. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2-х т. Т.2 Вихретоковый контроль / под. ред. В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2003. – 688с.
5. Stucky P. Skin depth considerations in eddy current NDT / P. Stucky, W. Lord // Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, New-York. – 1992. – Vol 11. – P. 299–306.
6. Hagemaiер D.J. Eddy current standart depth of penetration / D.J Hagemaiер // Materials Evaluation. – 1985. – Vol. 43, №1. – P. 1438–1441.
7. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272с.
8. Учанін В. М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання / В.М. Учанін. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.
9. Yashan A. Use of GMR-sensors for eddy current testing / A. Yashan, R. Becker, G. Dobmann // Short papers of 6th International Workshop on electromagnetic nondestructive evaluation (Budapest, June 28-30, 2000). – 2000. – P. 119–120.
10. Baldev R. Practical non-destructive testing / R. Baldev, T. Jayakumar, M. Thavasimuthu. – India: Woodhead Publishing, 2002. – 184 p.

11. Johnson M. J. Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection. – UK: The University of Surrey, 1997 – 154 p.
12. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. В.В. Панасюка, З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134с.
13. Методы неразрушающих испытаний / под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1972. – 496с.
14. Учанин В.Н. Подавление влияния зазора при безконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов / В.Н. Учанин, Г.Н. Макаров Г.Н. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – №4. – С. 41–45.
15. Федосеенко Ю.К. Основы нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов / Ю.К. Федосеенко // Дефектоскопия. – 1981. – №6. – С. 38–45.
16. Пустынников В.Г. Общий принцип формирования многомерного сигнала в устройствах для многочастотного контроля / В.Г. Пустинніков // Изв. вузов Электромеханика. – 1965. – №9. – С. 1056–1062
17. Учанин В.Н. Влияние параметров трещины труб теплообменника на сигнал внутреннего коаксиального вихретокового преобразователя / В.Н. Учанин // Материалы 18-й Междунар. конф. «Современные средства НК и ТД», г. Ялта. – 2010. – С. 112–114.
18. Пчелинцев Д.О., Игнатьев С.А. Автоматизированное распознавание локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников при вихретоковом контроле с использованием вейвлет-преобразования // Вестник Саратовского Государственного Технического Университета. Серия Автоматизация и управление. – 2009. – №3 – С. 1–8.
19. Мак–Мастер Р. Неразрушающие испытания. Т. 2. / Р. Мак–Мастер; пер. с англ. под ред. Т. К. Зиловой, И. И. Кифера. – М., Л. : Энергия, 1965. – 492 с.

20. Дрейзин В.Э. Систематизация способов получения и обработки многомерных сигналов в электромагнитном многопараметровом неразрушающем контроле / В.Э. Дрейзин // Дефектоскопия. – 1981. – №6. – С. 28–37.

21. Зыбов В.Н. Принципы селекции при вихретоковом контроле / В.Н. Зыбов, Л.Я. Мизюк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1994. – №2. – С. 42–54.

22. Дорофеев А.Л. Проблемы индукционного контроля качества поверхностного упрочнения конструкционных сталей в машиностроении / А.Л. Дорофеев, Б.А. Кадышкин, С.Н. Садовников, А.Г. Косарин, Воскобойникова А.С. Эльконина М.Б. // Многопараметровый контроль в машиностроении; Ростовский ин-т сельскохозяйственного машиностроения. – 1971. – № 1. – С. 88-89.

23. А.с. 1057844 СССР, МКИ G01N 27/90. Устройство для электромагнитного контроля металлических изделий / А.Я. Тетерко, В.Н. Учанин, В.Н. Зыбов. – №3439998/25- 28; заявлено 18.05.82, опубл. 30.11.83, Бюл. №44. – 3 с.

24. А.с. 1434375 СССР, МКИ G01N 27/90. Способ вихретокового многопараметрового контроля изделий / В.Н. Зыбов. – № 4112633/25-28 – заявлено 04.09.86, опубл. 30.10.88, Бюл. №40. – 3с.

25. Дорофеев А.Л. Индукционная толщинометрии / А.Л. Дорофеев, А.И. Никитин, А.Л. Рубин. – М.: Энергия, 1978. – 184с.

26. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / П. П. Орнатский. — К.: Висшая школа, 1986. — 604 с.

27. Твердохлебов В. А. Методы интерполяции в техническом диагностировании / В.А. Твердохлебов // Проблемы управления. – 2007. – №2. – С. 28 –34.

28. Маєвський С.М. Роздільний вихрострумівий контроль дефектів і товщини фарбового покриття / С.М. Маєвський // Техніческая диагностика и

неразрушающий контроль / НАНУ, ІЕ ім. Є.О. Патона. – Київ, 2012. – № 3. С. 27–30.

29. Федосеенко Ю.К. Численный анализ систем уравнений нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов / Ю.К. Федосеенко // Дефектоскопия. – 1981. – №7. – С. 18–23.

30. Баштаников Л.А. Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий / Л.А. Баштаников, В.И. Бондаренко, А.П. Себко, В.И. Тюпа // Дефектоскопия. – 1980. – №8. – С. 5–9.

31. Мэтьюз Д. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Мэтьюз, К. Финк. – М.: Вильямс, 2001. – 720 с.

32. Ивашко А.В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / А.В. Ивашко – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – 233 с.

33. Гальченко В.Я. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Дефектоскопия. – 2009. - № 3. – С. 56-66.

34. Бакурин В.Н. Вихретоковый измеритель толщины / В.Н. Бакурин, А.О. Каравашкин // Сб. докл. IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум – 2013», Российская Академия Естествознания. – 2013. – С. 1–13.

35. Дорофеев А.Л. Измерения толщины покрытий с помощью вихревых токов / А.Л. Дорофеев, Г.А. Любашов, Ю.Я. Останин. – М.:Машиностроение, 1975. – 65 с.

36. Waidelich D.L. Coating Thickness Measurement Using Pulsed Eddy Currents / D.L. Waidelich // Proc. nat. Electron. Conf. –1954. – №10. – pp. 500–507.

37. Waidelich D.L. Pulsed Eddy Curenets Gauge Plating Thickness / D.L. Waidelich // Electronics. – 1955. – № 28 (11). – pp. 146-147.

38. Waidelech D.L., Reduction of Probe-Spacing Effect in Pulsed Eddy Current Testing / D.L. Waidelech // ASTM, Symp. on Non-Destructive Tests in the Field of Nuclear Energy. – 1958. – №223. – pp. 191–200.
39. Renken C.J. A Double Pulsed Eddy Current Testing System / C.J. Renken, R.G. Myers. – USA: University of Michigan, 1959. – 40 p.
40. Patent 2965840 USA. Metal Resistivity Measuring Device / Renken C.J., Myers R.G. – № 2965840; Issued 12/20/60.
41. А.с. 238856 СССР, МКИ G01N 27/90. Импульсный индукционный способ измерения параметров изделий / Ю.М. Шкарлет, Ю.Н. Русскевич. – № 1123763/25-28; заявлено 03.05.67, опубл. 10.03.69, Бюл. №10 – 4с.
42. А.с. 868550 СССР, МКИ G01N 27/90. Импульсный электромагнитный способ толщинометрии ферромагнитных труб / А.Ф. Чуб, А.П. Стипура. – № 2864807, заявлено 04.01.80, опубл. 30.09.81, Бюл. №36.
43. Яцун М.А. Разработка теории экранированных вихретоковых преобразователей и их применение для контроля труб нефтяного сортамента: дис. ... доктора техн. наук : 05.02.11 / Яцун Михайи Андреевич. – Ивано-Франковск, 1983. – 350 с.
44. Сандовский В.А. Вихретоковый контроль с применением электромагнитного поля в виде импульса с высокочастотным заполнением / Сандовский В.А., Дякин В.В., Дударев М.С. // Дефектоскопия. – 1986. – Вип. 5. – С. 38–45.
45. Vasic D. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes / D. Vasic, V. Bilas, D. Ambrus // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2004. – vol. 53, no. 4. – pp. 1289-1294.
46. Morris R. A. Quantitative Pulsed Eddy Current Analysis / R. A. Morris // Proc. of the 10th Symposium on NDE – 1975. – pp. 90-97.
47. Thyagarajan K. Pulsed Eddy Current Imaging of Corrosion Pits / K. Thyagarajan., B. Maxfield, K. Balasubramaniam, C.V. Krishnamurthy // J. Nondestructive Testing & Evaluation. – 2008. – Vol 7(2). – pp. 32–36.

48. Babbar V. K. Finite Element Modeling Of Pulsed Eddy Current Signals From Conducting Cylinders And Plates / V. K. Babbar, P. V. Kooten, T. J. Cadeau, and T. W. Krause // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation: AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol. 28 – pp. 311-318.

49. Yong Li. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation / Yong Li, Gui YunTian, Anthony Simm // NDT & E International. – 2008 – Vol. 41, Iss. 6 – pp. 477–483

50. Li J. Reduction of lift-off effect for pulsed eddy current testing based on equivalent magnetic circuit model analysis [Electronic resource] / J. Li, X. Wu, Q. Zhang, D. Deng // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/59_Li_Rev1.pdf (last access: 09.09.17).

51. Liu B. Optimization design of pulsed eddy current probe based on simulation [Electronic resource] / B. Liu, P. Huang, X. Chen, L. Zhao // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/488_Baoling.pdf (last access: 09.09.17).

52. Elshafiey I. Comparison of Computational Modeling Techniques of Pulsed Eddy Current Inspection / I. Elshafiey // Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proc. of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conference Proceedings. – 2009/ – Vol. 1096, Iss. 1 – pp.319-326.

53. Яцун М.А. Чутливість характеристик власних загасаючих коливань перехідної напруги накладного вихрострумowego перетворювача над об'єктом контролю у формі пластини до її магнітної проникності і електричної провідності / М.А. Яцун, А.М. Яцун // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Львів, 2008. – №615. – С. 176-181.

54. Яцун М.А. Наближена числова реалізація зворотного перетворення Лапласа загасаючих коливань у разі неруйнівного контролю імпульсним вихрострумовим методом / Яцун М.А., Яцун А.М., Шуплат О.І. // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Львів, 2010. – №671. – С. 140-146.

55. Яцун А.М. Определение переходных и операторных индуктивных параметров проходного внутреннего кольцевого вихретокового преобразователя в проводящей трубе / Яцун А.М. // Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2015. – Vol. 17. No. 4. – pp. 55-59.

56. Plotnikov Y. Subsurface defect detection in metals with pulsed eddy current / Y. Plotnikov, W.J. Bantz // Review of Quantitative NDE. – 2005. – vol. 24. – pp. 447-454.

57. Cadeau T. Pulsed eddy current probe desing based on transient circuit analysis / T.J. Cadeau, T.W. Krause // Review of Quantitative NDE. – 2009. – vol. 28. – pp. 327-334.

58. Yang G. Pulsed Eddy-Current Based Giant Magnetoresistive System for the Inspection of Aircraft Structures / G. Yang, A. Tamburrino, L. Udpa, S. Udpa // IEEE Trans. Magn. – 2010. – vol. 46, no. 3. – pp. 910-917.

59. Яцун М.А. Споживана потужність і кут зсуву фаз між напругою і струмом накладного кільцевого екранованого перетворювача над провідною пластиною [Електронний ресурс] / М. А. Яцун, А. М. Яцун // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2013. - № 758. – С. 148-152.

60. Суслов Є.Ф. Використання перетворення гілберта для отримання додаткових інформативних ознак при імпульсному імпедансному контролі композиційних матеріалів / Є.Ф. Суслов, В.С. Єременко, А.Г. Протасов, Ж.О. Павленко // Наукові вісті НТУУ "КПІ" – Київ, 2016. – №1. – С. 117–123.

61. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М. : Высшая школа. 1992. – 312 с.

62. Лукашов В.М. Экспериментальное исследование импульсного метода в вихретоковой дефектоскопии / В.М. Лукашов // материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2014 г., М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – С. 247 – 250.
63. Бабак В.П. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Еременко, Ю.В. Куц и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины В. П. Бабака / – К., 2014. – 832 с.
64. Білокур І. П. Основи дефектоскопії : підручник./ І.П. Білокур – К.: Азимут-Україна, 2004. – 495 с
65. Рускевич Ю.Н. Импульсный электромагнитный метод измерения параметров проводящих изделий / Ю.Н. Рускевич, Ю.М. Шкарлет // Электромагнитные методы контроля. – 1969.– С. 128-135.
66. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М. : Энергия, 1978. – 216 с. ил.
67. Portable Pulsed Eddy Current Instrument [Electronic resource] // ACUTECH Ltd. – Mode of access: <http://www.acutech.gr/media/pdf/Pulsesec.pdf> – last access: 2017. – Title from screen.
68. Юдинцев В. GMR-датчики. Глаза, нервы, мозг электронных систем / В. Юдинцев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. –2008. – №1. – С. 52–59.
69. Федоров С.И. Выбор типа магниточувствительного элемента для устройства определения концентрации полезного компонента в рудах черных и цветных металлов / С.И. Федоров // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2012. – №88 – С. 55-61.
70. Eddyfi Lyft [Electronic resource] // Eddyfi. – Mode of access: <http://www.eddyfi.com/lyft/> – last access: 2017. – Title from screen.

71. Импульсный вихретоковый дефектоскоп Eddyfi Lyft [Електронний ресурс] // Пергам. – Режим доступу: http://www.pergam.ua/catalog/nondestructive_testing/eddy_current_testing/kontrol-izolyacii/vihretokovyj-defektoskop.htm – Назва зі сторінки Інтернету.
72. Advanced Non-destructive Testing [Electronic resource] // RTD INCOTEST – Mode of access: http://www.applusrtd.com/en/service/RTD_INCOTEST%E2%84%A2-1340227850323 – last access: 2017. – Title from screen.
73. Yang L. Techniques for Corrosion Monitoring / L. Yang. – USA: Elsevier, 2008. – 712 p.
74. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий классификация видов и методов. – Взамен ГОСТ 18353-73; введ. 01.07.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 12 с.
75. ГОСТ Р 55611-2013. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 2015-01-01. – М: Управление по метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, Технический комитет по стандартизации ТК 371 «Неразрушающий контроль»; М.: Стандартиформ. 2015. – 12 с.
76. BS ISO 20669:2017. Non-destructive testing -- Pulsed eddy current testing of ferromagnetic metallic components. – Public. date : 2017-03; Technical Committee: ISO/TC 135/SC 4 Eddy current testing; Ed. 1. – 2017. – 13p.
77. Буров В.Н. Автоматическая обработка информации в электромагнитном контроле геометрических и электрических параметров изделий/ В.Н. Буров, В.Е. Шатерников // Дефектоскопия. – 1980. – №6. – С. 15–22.
78. Учанін В.М. Вплив анізотропії електропровідності контрольованого матеріалу на сигнал вихрострумового перетворювача мальтидиференційного типу / В.М. Учанін, В.Г. Рибачук // Електромагнітний, акустичний та оптичний неруйнівний контроль матеріалів

та виробів. Сер.: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2009. - Вип. 14. – С. 97–104.

79. Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51. – С. 58–63.

80. Лысенко Ю. Ю. Импульсная Вихретоковая Дефектоскопия / Ю. Ю. Лысенко, Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, А.Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2017. – №216. – С. 114–117.

81. Лисенко Ю. Ю. Моделювання задач вихрострумового неруйнівного контролю в середовищі Matlab / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко // IX міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2010: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2010. – С. 237-238.

82. Лисенко Ю. Ю. Дослідження мультидиференційного вихрострумового перетворювача в імпульсному режимі збудження / Лисенко Ю. Ю. Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2016: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2016. – С. 172-173.

83. Лысенко Ю. Ю. Анализ информационных параметров сигналов импульсного вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин А.Л. // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» (23-25 ноября 2016р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 88-90.

84. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1967. – 776 с.

85. Гальченко В.Я. Структурный синтез накладных вихретоковых преобразователей с заданным распределением зондирующего поля в зоне контроля / В.Я. Гальченко, М.А. Воробьев // Дефектоскопия. -2005. -№1. -С. 40-46.

86. Лосев А.К. Линейные радиотехнические цепи: Учебник для вузов. / А.К. Лосев. – М.: Высш. шк., 1971. – 560 с.
87. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей / А.Ф. Белецкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
88. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: Учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. / М.Р. Шебес. – М.: Высшая школа, 1982. – 488 с., ил.
89. Пичурин Л.Ф. За страницами учебника алгебры / Л.Ф. Пичурин. – М.: Просвещение, 1990. – 228 с.
90. Бучма І.М. Засоби вихрострумової діагностики корозійного стану сталевих листових конструкцій: монографія / І.М. Бучма, Т.М. Репетило, К.В. Ферчук. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 292 с.
91. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1977. — 830 с.
92. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
93. Куц Ю.В. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак // Технологические системы. – 2004. – №2. – С. 50–55.
94. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006г. – 656с.: ил.
95. Suslov E. Using Hilbert Transform for Signal Processing in Mechanical Impedance Analysis [Electronic resource] / E. Suslov, V. Eremenko I. Lysenko, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p172.pdf> (last access: 05.10.17).
96. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604с.
97. Хандецький В.С. Обробка сигналів / В.С. Хандецький, В.П. Бабак, Е. Шрюфер – Київ: «Либідь», 1999. – 495с.

98. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. / А. Оппенгейм, Р. Шафер – М.: Техносфера, 2006. – 856 с.
99. Пат. 79648 Україна, МПК G01N 27/90. Спосіб визначення характеристик сигналу для вихрострумової дефектоскопії / Ю.В. Куц, В.К. Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В. Куц, В.К. Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко. – № u201213068; заявл. 16.11.2012 ; опублік. 25.04.2013, Бюл. № 8. – 5 с.
100. Пат. 82594 Україна, МПК G01N 27/00. Спосіб імпульсного вихрострумового контролю об'єктів циліндричної форми / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко. – № u201303403; заявл. 20.03.2013 ; опублік. 12.08.2013, Бюл. № 15. – 6 с.
101. Лысенко Ю. Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц // «Научные известия на НТСМ». – Созополь, Болгария, 2011. – №121. – С. 22–24.
102. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2014. – №150. – С. 28–30.
103. Лысенко Ю. Ю. Применение методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле / Ю. Ю. Лысенко, Ю.В. Куц, А.В. Дергунов // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2016. – №187. – С. 38–42.
104. Лисенко Ю. Ю. Використання перетворення Гільберта в задачах обробки сигналів вихрострумового неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю. // XV Міжнар. молодіжн. форум ["Радіоелектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – Т. 2, С. 224-225.
105. Лисенко Ю. Ю. Аналіз методичних похибок визначення інформативних характеристик сигналів вихрострумової дефектоскопії / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // X міжнародна науково-технічна конференція

«Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2011. – С. 194-195.

106. Лисенко Ю. Ю. Розвиток імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 184-185.

107. Лысенко Ю. Ю. Использование амплитудной и фазовой характеристик сигнала в приборах вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Авраменко Б.В. // 8-я Международная научно-техническая конференция молод. уч. и студ. «Новые направления развития приборостроения -2016» (20-22 апреля 2016г. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции, Т. 1 / БНТУ. – Минск, 2016. – Т. 1, С. 6.

108. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю. Лазарев Ю. – К.: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

109. Єременко В.С. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / В.С. Єременко, Ю.В. Куц, В.М. Мокійчук, О.В. Самойліченко – К.: НАУ, 2015. – 321 с.

110. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц., Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383с.

111. Квантили распределения Стьюдента / Свободная энциклопедия Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B8_%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%A1%D1%82%D1%8C%D1%8E%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0 – Название со станицы Интернета.

112. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: First edition. — JCGM, Switzerland, 1993. – 120 p.

113. ДСТУ-Н РМГ 43-2006. Метрологія. Застосування «Настанови з оцінювання невизначеності у вимірюваннях». – введ. 01-01-2007. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2006. – 28с.

114. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б Двайт; пер. с англ. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1973. – 228 с

115. Куц Ю. В. Імпульсний вихрострумний контроль об'єктів циліндричної форми / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 69–75.

116. Лисенко Ю.Ю. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю.Ю. Лисенко, Ю.В. Куц, В.Ф. Петрик, О.Л. Дугін // «Научные известия на НТСМ». – Созополь, Болгария, 2013. – № 139 – С. 72 – 74.

117. Lysenko I. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko_Rev1.pdf (last access: 15.09.17).

118. Куц Ю. В. Імпульсний вихрострумний контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2015. – Вип. 49. – С. 68–74.

119. Лысенко Ю. Ю. Методика обработки сигналов в системах импульсной вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю.Лысенко, Ю.В. Куц, А.Л. Дугин // 8-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2015» (25-27 ноября 2015г. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2015. – Т. 1, С. 244-246.

120. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016.

– № 7, Vol. 21. – Access mode:
<http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 15.09.17).

121. Лисенко Ю. Ю. Аналіз вихрострумового перетворювача з імпульсним збудженням під час контролю циліндричних об'єктів / Ю. В. Куц, О. Ф. Закревський, Ю. Ю. Лисенко, О. Л. Дугин // Фізико-хімічна механіка матеріалів: міжнар. наук.-техн. журн. / Нац. акад. наук України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка – Львів, 2016. – Том 52, №3. – С. 120–126

122. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // Materials Science – 2016. – vol. 52, no. 3. - pp 431–437.

123. Лисенко Ю. Ю. Використання імпульсного режиму збудження вихрострумового перетворювача при вимірюванні фізико-механічних параметрів циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2012: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 203.

124. Лисенко Ю. Ю. Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумових перетворювачів / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // зб. тез доповідей 7-ї Нац. наук.-техн. конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2012"] / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2012. – С. 162-163.

125. Лисенко Ю. Ю. Експериментальне дослідження імпульсного вихрострумового контролю циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Дугін О.Л. // XVII Міжнар. молодіжн. форум ["Радіоелектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2013. – Т. 2, С. 180-181.

126. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумовий неруйнівний контроль / Лисенко Ю. Ю., Водзик Д.П. // VI науково-практична конференція «Погляд у майбутнє приладобудування 2013». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 163.

127. Лисенко Ю. Ю. Оцінка товщини діелектричного покриття на провідній основі імпульсним вихрострумовим методом / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XIII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2014: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. – Київ, 2014. – С. 184-185.

128. Лисенко Ю. Ю. Візуалізація результатів вихрострумового контролю за допомогою діаграм Пуанкаре / Лисенко Ю. Ю. // XIV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 195-196.

129. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсного вихретокового контроля цилиндрических объектов / Лысенко Ю. Ю., Дугин А.Л. Закревский А.Ф. // XIV Междунар. молодежн. форума ["Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"]. Сборник трудов конфер. / ХНУРЭ. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – Т. 2, С. 205-206.

130. Лисенко Ю. Ю. Застосування імпульсної вихрострумової дефектоскопії для моніторингу технічного стану великогабаритних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Дугін О.Л. // зб. матеріалів 8-ї Нац. наук.-техн. конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2016"], (Київ, 22-24 листоп. 2016 р.) / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2016. – С. 174-178.

131. Лисенко Ю. Ю. Визначення координат дефектів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XVI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2017: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2017. – С. 155-156.

132. Lysenko I. Using Multidifferential Transducer for Pulsed Eddy Current Object Inspection / Y. Kuts, A. Protasov, I. Lysenko, D. Dugin, V. Uchanin, O. Bliznuk // 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (May 29 – June 02 2017, Kyiv, Ukraine). Conf. proceed. / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute– Kyiv, 2017.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державного підприємства
«Луцький ремонтний завод «Мотор»

М. Матрунчик

2016р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів кандидатської дисертаційної роботи
Лисенко Юлії Юріївни

Ми, що нижче підписались, головний технолог, начальник технічного відділу ДП «ЛРЗ «Мотор» Ю. Гусев, заступник директора з якості ДП «ЛРЗ «Мотор» О.Лясота.

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Лисенко Юлії Юріївни використовуються у виробничому процесі Державного підприємства «Луцький ремонтний завод «Мотор».

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Оцінка амплітудних та фазових характеристик сигналів накладного вихрострумowego перетворювача в режимі імпульсного збудження з подальшим використанням цих характеристик для виявлення ознак дефектності та зміни товщини діелектричного покриття виробу авіаційної техніки	Методика оцінювання амплітудних та фазових характеристик сигналів перетворювача та виявлення ознак дефектності та зміни товщини діелектричного покриття. Програмне забезпечення для опрацювання інформативних сигналів вихрострумowych перетворювачів в режимі імпульсного збудження.

Головний технолог, начальник
технічного відділу ДП «ЛРЗ «Мотор»

Заступник директора з якості ДП «ЛРЗ
«Мотор»

Ю.Гусев

О.Лясота

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного
факультету Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут»,
д.т.н., професор



Г.С. Тимчик

12 04 2016 р.

АКТ

про впровадження в навчальному процесі матеріалів кандидатської
дисертаційної роботи Лисенко Юлії Юріївни

В навчальному процесі кафедри приладів і систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» в ході розробки робочих навчальних програм та конспекту лекцій дисципліни «Електромагнітні методи неруйнівного контролю», розділ «Вихрострумний неруйнівний контроль» та розробки робочих навчальних програм та конспекту лекцій дисципліни «Технічні та медичні системи неруйнівного контролю», були впроваджені такі матеріали кандидатської дисертації Ю.Ю. Лисенко:

- спосіб двопараметрового контролю виробів з електропровідних матеріалів та методика його реалізації в умовах імпульсного збудження вихрострумного перетворювача, де в якості інформативних параметрів використовуються власна частота та загасання сигналів перетворювача;
- спосіб визначення та аналізу дискретних амплітудної та фазової характеристик сигналів вихрострумного неруйнівного контролю, який дозволяє виявляти локальні збурення сигналів вихрострумного перетворювача, викликані дефектами об'єкта контролю під час його сканування;
- методику та програмне забезпечення, яке реалізує спосіб оброблення сигналів з використанням дискретного перетворення Гільберта для отримання амплітудної та фазової характеристик сигналів та їх подальшого оцінювання та статистичного аналізу.

Завідувач кафедри приладів і систем
неруйнівного контролю
д.пед.н., доцент

А.Г. Протасов

ДОДАТОК Б

Програма виділення обвідної за допомогою комплексного сигналу $|u_c(t)|$

```
close all hidden; clear all;
set(0,'DefaultAxesFontSize',16,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');

tc = gauzpuls('cutoff', 50e3, 0.6, [], -40); % визначення інтервалу часу
t = -tc : 1e-6 : tc; % вектор моментів часу для
розрахунку
yi = 0.9.*gauzpuls(t,50e3,0.6); % розрахунок значень радіоімпульсу

hil=hilbert(real(yi)); %ПГ
B=sqrt(real(hil).^2+imag(hil).^2); %визначення обвідної
plot(t,yi, t,B,'m--','LineWidth', 2) %виведення результатів
hold on;grid on
plot(t,imag(hil),'r--')
xlabel('час');
ylabel('амплітуда');
```


ДОДАТОК В

Програма визначення коефіцієнта загасання у сигналу ВСП та
оцінювання похибки

```
% початкові умови:
alfa=2.5.*10.^5; %декремент (коефіцієнт загасання)
f=620.*10^3; %частота
U0=0.1; %напруга
dt = 1/(100*f); %час дискретизації
t=0:dt:0.00002; %інтервал часу
w0=2.*pi.*f;

%моделювання сигналу ВСП
U=U0.*exp(-alfa.*t).*sqrt(alfa.^2+w0.^2)./w0.*sin(w0.*t+atan(alfa./w0));

%внесення до сигналу ВСП завади, рівної 0,3% від амплітуди:
snr=20*log10(U0/(U0*0.003));%шум 0.3% від амп. сигналу
Ush = awgn(U,snr);

% ПГ
H=hilbert(Ush);
Hre=real(H);
Him=imag(H);
A=sqrt(Hre.^2+Him.^2);

%вибір інтервалу часу аналізу АХС
k1=99;
k2=399;
```

```
t1=k1*dt;
t2=k2*dt;
kt=t1:dt:t2;
```

```
%визначення коефіцієнта загасання (без апроксимації АХС)
alfa1(i)=1./(t2-t1).*log(A(k1)./A(k2));
dalfa = abs(alfa(i) - alfa1(i)); %різниця з заданим значенням частоти
dalfa_otn = dalfa/alfa(i)*100; %відносна похибка
```

```
% апроксимація АХС
k3=k1:1:k2;
p=polyfit(k3,A(k3),5);
A21=polyval(p,k3);
```

```
%визначення коефіцієнта загасання (з апроксимацією АХС)
alfa21(i)=1./(t2-t1).*log(A21(1)./A21(k2-k1+1));
dalfa21 = abs(alfa(i) - alfa21(i)); % різниця з заданим значенням частоти
dalfa_otn21 = dalfa21/alfa(i)*100; % відносна похибка
```

ДОДАТОК Г

Програма визначення частоти та оцінювання похибки

```

% початкові умови:
alfa=2.5.*10.^5; %декремент
f=620.*10^3; %частота
U0=0.1; %напруга
dt = 0.000000005; %час дискретизації
t=0:dt:0.00002; %інтервал часу
w0=2.*pi.*f;

%моделювання сигналу ВСП
U=U0.*exp(-alfa.*t).*sqrt(alfa.^2+w0.^2)./w0.*sin(w0.*t+atan(alfa./w0));

%внесення до сигналу ВСП завади, рівної 0,3% від амплітуди:
snr=20*log10(U0/(U0*0.003));%шум 0.3% від амп. сигналу
Ush = awgn(U,snr);

% ПГ
H=hilbert(Ush);
Hre=real(H);
Him=imag(H);
phi=atan2(Him,Hre);%фаза
F=unwrap(phi);

%вибір інтервалу часу аналізу ФХС
n1=200;
n2=1800;

```

% визначення частоти без лін тренда

$$f1 = (F(n2) - F(n1)) / (2 * \pi * dt * (n2 - n1 + 1))$$

df = abs(f - f1) % різниця з заданим значенням частоти

$$df_otn = df / f * 100 \text{ \% відносна похибка}$$

% визначення лін. тренду ФХС

$$dn = (n2 - n1) / 3;$$

$$Y1 = \text{sum}(F(n1:n1+dn));$$

$$X1 = \text{sum}(n1:n1+dn);$$

$$Y2 = \text{sum}(F(n1+dn:n1+2*dn));$$

$$X2 = \text{sum}(n1+dn:n1+2*dn);$$

$$Y3 = \text{sum}(F(n1+2*dn:n2));$$

$$X3 = \text{sum}(n1+2*dn:n2);$$

$$k = (Y3 - Y1) / (X3 - X1);$$

$$b = Y2 / dn - k * X2 / dn;$$

$$x = [n1:n2+1];$$

$$y = k * x + b;$$

% визначення частоти за лін трендом ФХС

$$m1 = 1; m2 = n2 - n1 + 1;$$

$$\Delta T = dt * (m2 - m1 + 1);$$

$$Fi1 = y(m1);$$

$$Fi2 = y(m2);$$

$$\Delta Fi = Fi2 - Fi1;$$

$$f21 = \Delta Fi / (2 * \pi * \Delta T)$$

df21 = abs(f - f21) % різниця з заданим значенням частоти

$$df_otn21 = df21 / f * 100 \text{ \% відносна похибка}$$

ДОДАТОК Д

Функція визначення частоти власних коливань та коефіцієнта загасання
сигналу через дискримінант кубічного рівняння

```
function [ a,f ] = FreqDecr( R,C1,R1,L1,M,L2,R2 )
%згідно характеристичного рівняння, виду  $Ap^3+Bp^2+Cp+D=0$ 
A=C1*R*(L1*L2-M^2);
B=C1*R*L1*R2+C1*R1*L2*R+L1*L2-M^2;
C=L2*R+C1*R1*R2*R+L2*R1+L1*R2;
D=R*R2+R1*R2;
%перехід до рівняння канонічної форми, виду  $y^3+ky+q=0$ 
B1=B/A;
B2=C/A;
B3=D/A;
k=-(B1^2)/3+B2;
q=(2*B1^3)/27-B1*B2/3+B3;
%дискримінант квадратичного рівняння:
d=(q/2)^2+(k/3)^3
%корені
p1=-(1/2)*((-q/2+sqrt(d))^(1/3)+(-q/2-sqrt(d))^(1/3))+i*((sqrt(3)/2)*((-q/2+sqrt(d))^(1/3)-(-q/2-sqrt(d))^(1/3)))-B/(3*A)
p2=-(1/2)*((-q/2+sqrt(d))^(1/3)+(-q/2-sqrt(d))^(1/3))-i*((sqrt(3)/2)*((-q/2+sqrt(d))^(1/3)-(-q/2-sqrt(d))^(1/3)))-B/(3*A)
a=-real(p1)
f=-imag(p1)/(2*pi)
end
```

ДОДАТОК Е

1. Лысенко Ю. Ю. Применение преобразования Гильберта для анализа сигналов вихретоковой дефектоскопии / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц. // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2011. – №121. – С. 22–24. *(Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»).*
2. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумівий контроль об'єктів циліндричної форми / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 69–75 *(Входить до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «WorldCat», «РИНЦ», «Google Scholar», «BASE», «OpenAIRE» та інших).*
3. Лысенко Ю. Ю. Экспериментальное исследование вихретоковой системы контроля крупногабаритных изделий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2013. – №139. – С. 72–74. *(Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»).*
4. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсной вихретоковой системы контроля диэлектрических покрытий / Ю. Ю. Лысенко, Ю. В. Куц, В. Ф. Петрик, А. Л. Дугин // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2014. – №150. – С. 28–30. *(Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»).*
5. Lysenko I. Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing of the Coating Thickness [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – № 12, Vol. 19. – Access mode: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/187_Lysenko_Rev1.pdf

f (last access: 05.07.17) (*Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»*).

6. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумний контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2015. – Вип. 49. – С. 68–74 (*Входить до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «WorldCat», «РИНЦ», «Google Scholar», «BASE», «OpenAIRE» та інших*).

7. Лисенко Ю. Ю. Аналіз вихрострумного перетворювача з імпульсним збудженням під час контролю циліндричних об'єктів / Ю. В. Куц, О. Ф. Закревський, Ю. Ю. Лисенко, О. Л. Дугин // Фізико-хімічна механіка матеріалів: міжнар. наук.-техн. журн. / Нац. акад. наук України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка – Львів, 2016. – Том 52, №3. – С. 120–126 (*Входить до міжнародної наукометричної бази «Google Scholar»*).

8. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p91.pdf> (last access: 05.07.17) (*Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»*).

9. Лысенко Ю. Ю. Применение методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле / Ю. Ю. Лысенко, Ю.В. Куц, А.В. Дергунов // Ж-л «Научные известия на НТСМ». - Созополь, Болгария, 2016. – №187. – С. 38–42. (*Входить до міжнародних наукометричних баз «The Web's Largest Open Access Database of NDT», «Google Scholar»*).

10. Лисенко Ю. Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумному контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51. – С. 58–63 (*Входить до міжнародних наукометричних*

баз «*Index Copernicus*», «*WorldCat*», «*РИНЦ*», «*Google Scholar*», «*BASE*», «*OpenAIRE*» та інших).

11. Analysis of an Eddy-Current Transducer with Impulsive Excitation in the Nondestructive Testing of Cylindrical Objects / Y. Kuts, Y. Lysenko, A. Dugin, A. Zakrevskii // *Materials Science* – 2016. – vol. 52, no. 3. – pp 431–437. (Входить до міжнародної наукометричної бази *Scopus*).

12. Пат. 79648 Україна, МПК G01N 27/90. Спосіб визначення характеристик сигналу для вихрострумової дефектоскопії / Ю.В.Куц, В.К.Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В.Куц, В.К.Цапенко, А.Г. Протасов, Ю.Ю. Лисенко. – № u201213068 ; заявл. 16.11.2012 ; опублік. 25.04.2013, Бюл. № 8. – 5 с.

13. Пат. 82594 Україна, МПК G01N 27/00. Спосіб імпульсного вихрострумового контролю об'єктів циліндричної форми / Ю.В.Куц, Ю.Ю. Лисенко; власники Ю.В.Куц, Ю.Ю. Лисенко. – № u201303403; заявл. 20.03.2013 ; опублік. 12.08.2013, Бюл. № 15. – 6 с.

14. Лисенко Ю. Ю. Моделювання задач вихрострумового неруйнівного контролю в середовищі Matlab / Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко // IX міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2010: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2010. – С. 237-238.

15. Лисенко Ю. Ю. Використання перетворення Гільберта в задачах обробки сигналів вихрострумового неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю. // XV Міжнар. молодіжн. форум ["Радіoeлектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – Т. 2, С. 224-225.

16. Лисенко Ю. Ю. Аналіз методичних похибок визначення інформативних характеристик сигналів вихрострумової дефектоскопії / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 194-195.

17. Лисенко Ю. Ю. Використання імпульсного режиму збудження вихрострумowego перетворювача при вимірюванні фізико-механічних параметрів циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2012: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 203.

18. Лисенко Ю. Ю. Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумових перетворювачів / Ю. Ю. Лисенко, Ю. В. Куц // зб. тез доповідей 7-ї Нац. наук.-техн. конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2012"] / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2012. – С. 162-163.

19. Лисенко Ю. Ю. Експериментальне дослідження імпульсного вихрострумowego контролю циліндричних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Дугін О.Л. // XVII Міжнар. молодіжн. форум ["Радіoeлектроніка та молодь в ХХІ ст."]. Збірник тез доповідей / ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2013. – Т. 2, С. 180-181.

20. Лисенко Ю. Ю. Розвиток імпульсного вихрострумowego неруйнівного контролю / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В. // XII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 184-185.

21. Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумовой неруйнівний контроль / Лисенко Ю. Ю., Водзик Д.П. // VI науково-практична конференція «Погляд у майбутнє приладобудування 2013». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 163.

22. Лисенко Ю. Ю. Оцінка товщини діелектричного покриття на провідній основі імпульсним вихрострумowym методом / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XIII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2014: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2014. – С. 184-185.

23. Лисенко Ю. Ю. Візуалізація результатів вихрострумового контролю за допомогою діаграм Пуанкаре / Лисенко Ю. Ю. // XIV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 195-196.

24. Лысенко Ю. Ю. Исследование импульсного вихретокового контроля цилиндрических объектов / Лысенко Ю. Ю., Дугин А.Л. Закревский А.Ф. // XIV Междунар. молодежн. форума ["Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке"]. Сборник трудов конфер. / ХНУРЭ. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – Т. 2, С. 205-206.

25. Лысенко Ю. Ю. Методика обработки сигналов в системах импульсной вихретоковой дефектоскопии / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин А.Л. // 8-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2015» (25-27 ноября 2015р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2015. – Т. 1, С. 244-246.

26. Лысенко Ю. Ю. Использование амплитудной и фазовой характеристик сигнала в приборах вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Авраменко Б.В. // 8-я Международная научно-техническая конференция молод. уч. и студ. «Новые направления развития приборостроения -2016» (20-22 апреля 2016р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции, Т. 1 / БНТУ. – Минск, 2016. – Т. 1, С. 6.

27. Лисенко Ю. Ю. Дослідження мультидиференційного вихрострумового перетворювача в імпульсному режимі збудження / Лисенко Ю. Ю. Куц Ю.В., Дугін О.Л. // XV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2016: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2016. – С. 172-173.

28. Лисенко Ю. Ю. Застосування імпульсної вихрострумової дефектоскопії для моніторингу технічного стану великогабаритних об'єктів / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Дугін О.Л. // зб. матеріалів 8-ї Нац. наук.-техн.

конф. ["НК та технічна діагностика - UkrNDT-2016"], (Київ, 22-24 листоп. 2016 р.) / УТ НКТД – Київ: УТ НКТД, 2016. – С. 174-178.

29. Лысенко Ю. Ю. Анализ информационных параметров сигналов импульсного вихретокового контроля / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугин А.Л. // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» (23-25 ноября 2016р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 88-90.

30. Лисенко Ю. Ю. Визначення координат дефектів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лисенко Ю. Ю., Куц Ю.В., Дугін О.Л., // XVI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2017: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2017. – С. 155-156.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи” (м. Київ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародній конференції «Дні неруйнівного контролю» (м. Созополь, Республіка Болгарія, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017); міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2011, 2013, 2015); національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2012» (м. Київ, 2012), «Неруйнівний контроль та технічна діагностика - UkrNDT-2016» (м. Київ, 2016); європейській конференції «11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)» (м. Прага, Чеська Республіка, 2014); світовій конференції «19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)» (м. Мюнхен, Німеччина, 2016); міжнародних науково-технічних конференціях «Приборостроение-2015» та «Приборостроение-2016» (м. Мінськ,

Республіка Білорусь, 2015, 2016); міжнародній науково-технічній конференції IEEE «Електротехніка та комп'ютерна інженерія» (IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, «UKRCON 2017») (м. Київ, 2017).